



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Comparaison environnementale d'une Enrobé Coulé à Froid (ECF) avec autres techniques d'entretien

Treball realitzat per:

Eugenio Wenceslao LLOP SAYSON

Dirigit per:

José TURMO CODERQUE

Anne DONY (Tutora externa)

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 19 de setembre de 2016

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE GRAU

REMERCIEMENTS

Ce projet est l'extension d'un projet réalisé à l'École Spéciale de Travaux Publics (ESTP), au cours de mon échange comme étudiant du Double Diplôme UPC-ESTP. Ces projets sont appelés Projets Industriels, d'Entrepreneuriat et de Recherche (PIER), et le PIER dont le résultat de l'extension constitue ce TFG a été réalisé intégralement en un contexte français. En plus, ce PIER avait comme partenaire une entreprise routière française appelée Probinord qui a voulu aussi le continuer une fois l'année académique était finie, donc même l'extension de ce PIER était complètement réalisée en un contexte français.

Je voulais donc remercier beaucoup l'aide des deux professeures encadrantes de ce projet à l'ESTP, Mme. DONY et Mme. ZIYANI, qui m'ont largement assisté pendant tout le long de ce projet, en me donnant de leur temps et en m'aidant avec les problèmes que j'avais.

Je suis reconnaissant à Probinord de me faire confiance dans mon travail et Mme. CHARTON et M. ZAOUALI de m'accorder de leurs temps pour ce projet.

Merci aussi à M. CAVAGNOL pour avoir résolu les doutes que j'avais concernant le logiciel SEVE.

Je remercie à Arbia GARFA de partager son thèse sur les agrégats d'enrobés avec moi.

Et je remercie M. TURMO pour être mon professeur encadrant à l'ETSECCPB et pour accorder de son temps pour ce projet.

SOMMAIRE

Introduction	1
Contexte Environnemental	1
Les Enrobés Coulés à Froid (ECF)	3
Probinord, l'entreprise et son ECF	4
1. Objectifs.....	5
2. Comparaison des caractéristiques techniques des Enrobés Coulés à Froid (ECF) et des Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM).....	6
2.1. Comparaison des exigences des granulats des ECF et des BBTM	7
3. Démarche de Travail	8
3.1. Cadre du projet.....	9
3.2. Les différentes étapes de réalisation d'un ECF	10
3.3. Hypothèses choisies	11
3.3.1. Données nécessaires pour SEVE	11
3.3.2. Hypothèses à paramètres fixes ECF	12
3.3.3. Hypothèses à paramètres variables ECF	15
3.3.4. Hypothèses pour les BBTM.....	17
3.4. Méthode d'analyse des résultats SEVE	18
4. Comparaison des ECF entre eux	20
4.1. Présentation des résultats	20
4.2. Influence du transport des matériaux	22
5. Comparaison des ECF avec les BBTM.....	25
5.1. BBTM Classiques	25
5.1.1. Présentation des résultats	26
5.1.2. Interprétation des résultats	28
5.2. BBTM Tièdes.....	30
5.2.1. Présentation des résultats	30
5.2.2. Interprétation des résultats	32
6. Approfondissement sur les données de Probinord	34
6.1. Actualisation des hypothèses	34
6.1.1. Introduction de la machine ECF de Probinord	34
6.2.1. Changement de la carrière pour les BBTM de Magescq	36
6.2. Résultats avec les hypothèses actualisées	38
6.2.1. Présentation des résultats	38

6.2.2. Interprétation des résultats	39
7. Introduction des agrégats des enrobés aux ECF.....	41
7.1. Hypothèses	41
7.2. Présentation des résultats	41
7.3. Interprétation des résultats	42
8. Conclusions	43
8.1. Conclusions sur la méthodologie utilisée.....	43
8.2. Conclusions sur les résultats	44
9. Bibliographie	46

Introduction

Contexte Environnemental

De novembre à décembre de 2015 la XXI Conférence du Changement Climatique a eu lieu à Paris. Pendant ces jours, l'attention de tous était centrée à nouveau sur l'environnement, thème celui-ci qui est devenu de plus en plus important dans la société et que les citoyens de tout le monde sont de plus en plus conscients de son importance. Dans ce contexte de recherche de meilleures solutions face aux enjeux causés par notre trace sur la planète, plusieurs organismes internationaux sont en train de réagir depuis quelques années. Et parmi ces organismes on a l'Union Européenne, qui en collaboration directe avec les pays de l'Union, a été dès le commencement une pionnière de la lutte contre le changement climatique dans tous les secteurs économiques. Ce sont les nombreuses normes que l'UE a promu celles qui ont permis une avance significative dans la société européenne.



Figure 1: Logo de la XXI Conférence du Changement Climatique

Chez le BTP, secteur auquel se situe ce projet, l'aspect environnemental a eu historiquement une importance secondaire. Même si les activités du secteur ont un impact énorme sur l'environnement, c'était seulement depuis quelques peu dizaines d'années que les acteurs du BTP (Administration et entreprises) se sont coordonnés pour faire face à ces impacts. Heureusement, à ce moment-ci on peut se congratuler des nombreuses normes que les organismes européennes et nationaux ont mis en place pour limiter les émissions GES et la consommation de ressources naturels. En plus, il y a aussi des initiatives chez les entreprises du BTP pour devenir de plus en plus

écologiques, où on peut souligner la signature de nombreux acteurs du BTP de la Convention d'Engagement Volontaire (CEV) en 2009, qui engage tous les signataires à atteindre d'objectifs très ambitieux pour le Développement Durable (DD).¹

Pour atteindre ces objectifs, L'Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF), signataire du CEV, a développé un logiciel qui permet comparer différentes solutions techniques dès point de vue environnementale. Ce logiciel s'appelle le Système d'Evaluation des Variantes Environnementales (SEVE), qui a été utilisé en ce projet, et qui est le résultat de la coopération des plusieurs entreprises qui forment l'USIRF. La data dont SEVE a besoin pour fonctionner provient de ces entreprises, qui volontairement cèdent a la base de données du logiciel, et toutes les entreprises qui forment l'USIRF peuvent utiliser ce logiciel afin de trouver la solution technique la plus écologique parmi tous les solutions possibles. Le succès de SEVE est si grand, que l'USIRF a promu de créer une logiciel comme SEVE mais à niveau européen. Cette initiative est nommé *SustainEuroRoad* ² et est soutenue par plusieurs organismes routiers importants européens, parmi lesquels on trouve *La Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas* (ASEFMA).



Figure 2: Signataires de la Convention d'Engagement Volontaire (2009)

À mon avis, comme étudiant espagnol en train de faire le projet dans un contexte français, la coopération entre les pays de l'Union Européenne est indispensable afin

¹France. Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain. 25 mars 2009

² CAVAGNOL, I. (2016). "Life+ Sustaineuroroad Software" en *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*

d'avoir un cadre normatif qui soit efficace en la lutte contre le changement climatique. Pour y réussir, il faut une vision transversale qui soit capable d'entrevoir les nuances qu'il y a en chaque pays à l'heure d'appliquer les techniques ou méthodes de construction. J'ai eu l'opportunité, comme étudiant étranger en une École française, de percevoir de différences à l'heure de construire la même infrastructure, dès la réalisation jusqu'à l'exécution des travaux. Dans cet enjeux de la coopération, des initiatives comme *SustainEuroRoad* sont la référence à suivre, et le fait que les entreprises européennes ont l'initiative pour combattre le changement climatique est tout à fait une raison pour être optimiste de que le BTP s'est engagé pour le Développement Durable.

Ce projet maintient cette envie de mieux maîtriser les impacts sur l'environnement dans le BTP, en ce cas-ci en comparant avec le logiciel SEVE, introduit ci-dessus, les Enrobés Coulés à Froid (ECF) avec autres techniques d'entretien concurrentes avec l'ECF, notamment les Béton Bitumineux Très Mince (BBTM). Ainsi, j'obtiendrai comme résultat une solution plus écologique que l'autre en fonction du cas de chantier que j'étudie. Les cas de chantier seront fournis par Probinord, une entreprise routière française, partenaire de ce projet, qui me transmettra de chantiers à eux où je comparerai l'impact de son ECF par rapport aux autres techniques d'entretien. Les résultats seront puis fournis à Probinord.

Les Enrobés Coulés à Froid (ECF)

Les ECF sont composés par une émulsion de bitume, de granulats, d'additifs et d'une dope, tous ces composants se mélangeant au chantier à la mise en œuvre. Ils n'ont pas d'apport structurel car ils sont mis en couches très minces, mais ils sont devenus une des principales techniques d'entretien parce qu'ils ont très bonnes performances comme couche de roulement. À priori, ses caractéristiques techniques sont pareils aux BBTM (plus tard je démontrerai si cela se vérifie ou pas), mais les ECF sont plus économiques que les BBTM car la couche de ceux-là est plus mince que celle des BBTM et la mise en œuvre plus simple.

Probinord, l'entreprise et son ECF

Probinord est une entreprise spécialiste des travaux routiers depuis plus de 30 ans. Elle intervient partout en France et offre une gamme de choix de solutions à ses clients dans le domaine de l'entretien et de la rénovation des routes avec en plus une spécialisation dans les techniques d'ECF



Figure 3: Logo de Probinord

Afin d'assurer la réalisation des travaux, l'entreprise dispose d'un parc matériel répondant aux besoins matériels du chantier. Elle possède ainsi 11 ateliers mobiles et une unique usine de production d'émulsion de bitume implantée à Etampes (Essonne) en Île-de-France et distribuant tous les chantiers de Probinord sur le territoire français.



Figure 4: usine de liant de Probinord située à Méréville (91)

Les matériaux granulaires proviennent de carrières plus ou moins proches des chantiers. Parallèlement, Probinord possède un laboratoire d'étude et de recherche lui permettant un contrôle continu des formulations d'émulsion mais aussi d'ECF, une assistance technique comprenant préconisations et conseils mais aussi une activité développement, cherchant à améliorer ou adapter la technique des ECF au contexte technico-économique actuel.

1. Objectifs

J'ai déjà présenté un résumé des caractéristiques techniques des ECF par rapport aux BBTM. En tout cas, en ce projet je me centre en la partie écologique. Aussi à priori, les ECF émettent moins des GES et consomment moins d'énergie que les BBTM car ils sont produits et coulés en froid. C'est l'objectif de ce projet de vérifier si cela est vrai ou pas et, encore plus important, de chiffrer l'écart entre l'impact des ECF et l'impact des BBTM.

Je vais donc diviser cet objectif en deux parties: la première partie consiste en identifier tout ce qui agit sur cet écart; et la deuxième partie, en chiffrer proprement dit l'écart écologique entre les ECF et les BBTM.

Concernant la première partie, au long de ce projet je me suis rendu compte qu'il y a plein de facteurs qui agissent sur le bilan environnemental final, tels comme la distance de la carrière des granulats au chantier ou l'introduction d'enrobés recyclés (appelés agrégats d'enrobé) à la formule de l'ECF. La première chose qui a été faite donc pour pouvoir quantifier l'écart entre l'impact des ECF et celui des BBTM était d'identifier tous ces facteurs et prendre en compte que ceux qui ne sont pas négligeables, auprès d'une étude d'hypothèses.

Et concernant la deuxième partie, j'ai utilisé le logiciel SEVE pour comparer les deux techniques. D'abord, j'ai comparé en employant les cas fournis par Probinord mais sans inclure tous les facteurs possibles (comme son machine ECF, par exemple) pour avoir une première approximation. Et finalement, j'ai introduit tous les facteurs que j'avais identifié et puis j'ai comparé. En divisant cette partie en ces deux comparaisons j'ai pu mieux analyser l'importance des facteurs que je n'avais pas prise en compte dans la première comparaison.

Il faut aussi tenir compte que ce projet a comme partenaire l'entreprise Probinord, qui a un très grand intérêt pour que l'écart environnemental, qui théoriquement est positif pour l'ECF, soit quantifié avec son produit et dans ses cas de chantier. Cela lui permettra de démontrer que son produit est plus écologique (en cas que les résultats du projet lui soient favorables) avec un étude fait dans le cadre d'une Grand École française. Alors, il

faut ajouter un dernier objectif, qui est celui d'atteindre tous les objectifs présentés toute à l'heure mais dans le contexte de Probinord, et a une rythme de travail qui soit satisfaisant pour l'entreprise.

2. Comparaison des caractéristiques techniques des Enrobés Coulés à Froid (ECF) et des Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM)

À priori, les ECF et les BBTM sont des solutions pareilles dès un point de vue technique: tous les deux sont posés en couches très minces, donc ils sont dimensionnés pour l'entretien de routes (L'ECF en couches de 1 cm à 1.5 cm et les BBTM en couches de 2 cm à 3 cm). Quand même, comme après en la comparaison environnementale je considère l'hypothèse que ces deux produits sont pareils techniquement, j'ai trouvé nécessaire de vérifier cette hypothèse.

D'abord, le faible épaisseur des BBTM et des ECF implique qu'ils n'ont pas d'apport structurel à la chaussée³. Cela veut dire que les deux produits sont utilisés exclusivement pour la couche de roulement.

Les caractéristiques les plus importantes d'une couche de roulement sont l'étanchéité ou perméabilité, le bruit, l'adhérence et la durée de vie. Concernant l'étanchéité ou perméabilité, on a les BBTM qui sont perméables et les ECF qui sont étanches⁴. Pourtant, dans les cas que j'ai étudié l'étanchéité ou perméabilité ne sont pas prises en compte pour Probinord, donc qu'on considère toujours que l'ECF et les BBTM sont pareils techniquement. Concernant le bruit et l'adhérence, les deux produits ont une performance très bonne² et on peut les considérer équivalentes dans ces aspects. Et finalement, concernant la durée de vie, il n'y a pas assez d'études pour qu'on puisse affirmer qu'un produit soit plus durable que l'autre. Cependant, les derniers résultats montrent une tendance où les BBTM ont une durée de vie plus longue que celle des ECF. À priori, cela empêche que je puisse considérer pareils techniquement le BBTM et l'ECF. Quand même, les comparaison environnementales que j'ai effectué tiennent

³ Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées (2003). Guide technique juillet 2003. Paris: Service d'études techniques des routes et autoroutes.

⁴ Université Paul Sabater Toulouse III. Tome II Cours de Master de Routes 2011/2012.
< <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/pres/mastergc/telechargement/pedagogie/COURS%20ROUTE%20UPS%20MASTER%202011%20II%20Impression.pdf> > [Consulté le 7/09/2016]

compte dès l'extraction des matières premières jusqu'à la mise en œuvre. C'est-à-dire, je ne considère pas les impacts environnementaux que ces deux produits puissent produire pendant son utilisation et sa fin de vie. Alors, la durée que ces produits ont ne sont pas prises en compte dans ce projet, et on peut considérer toujours ceux-ci techniquement pareils.

2.1. Comparaison des exigences des granulats des ECF et les BBTM

Un facteur très important en l'étude environnementale de ces produits c'est le transport de ses composants. Parmi eux, on a les granulats, qu'on doit amener de carrières plus ou moins lointaines. Le choix de ces carrières est conditionné complètement pour la nature des granulats qu'on veut obtenir. Alors, il est primordial de bien définir les différences entre les granulats des ECF et les BBTM, car cela impliquera qu'on devra choisir une carrière et pas une autre à cause de ceux-là, et ce choix aura un "coût" environnemental plus ou moins grand en dépendant de la distance de la carrière au chantier.

Après la note informative⁵ de l'Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRM), qui synthétise les normes françaises sur la caractérisation des granulats des ECF et les BBTM, je conclue que les exigences des granulats sont pareils pour les deux produits, et que désormais je peux considérer les mêmes carrières pour ceux-ci.

Caractéristiques principales	Classes de trafic		
	< T3	T3 – T2	≥ T1
Caractéristiques intrinsèques des gravillons	Code C	Code B	
Caractéristiques de fabrication des gravillons	Code III		Code II
Caractéristiques de fabrication des sables	Code A		
Angularité des gravillons alluvionnaires	Code Ang 2	Code Ang 1	

Tableau 1: Exigences des granulats d'un ECF selon la classe de trafic

⁵ Norme matériaux bitumineux coulés à froid NF EN 12273 (2010). Note d'information n° 21. Paris: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.

Tout suite, au tableau 2, je présente les exigences des granulats de BBTM.⁶

Usages produits	Caractéristiques	Classes de trafic		
		≤ T3	T2 – T1	≥ T0
BBSG BBME BBM	Caractéristiques intrinsèques des gravillons	code C	code B	
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	code III		
	Caractéristiques de fabrication des sables (1)	code a		
	Angularité des gravillons et des sables alluvionnaires	code Ang 1		
BBDr BBTM BBUM	Caractéristiques intrinsèques des gravillons	code B		
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	code II		
	Caractéristiques de fabrication des sables (1)	code a		
	Angularité des gravillons et des sables alluvionnaires	Code Ang 1		
BBS	Caractéristiques intrinsèques des gravillons	code C		
	Caractéristiques de fabrication des gravillons	code III		
	Caractéristiques de fabrication des sables (1)	code a		
	Angularité des gravillons et des sables alluvionnaires	code Ang 3		

Tableau 2: Exigences des granulats des BBTM selon la classe de trafic

On voit que pour les deux produits, en cas qu'on ait la circulation la plus exigeante (T0), les granulats doivent avoir les mêmes caractéristiques. En plus, on voit que si l'exigence de la circulation descend, les ECF ont une exigence des caractéristiques pour ses granulats moins rigoureuse que celle des BBTM, qui restent pareils qu'avec les T0.

3. Démarche de travail

J'ai décidé d'utiliser le logiciel SEVE comme outil de calcul. Ce logiciel permet la comparaison environnemental de deux ou plusieurs techniques ou produits en demandant de saisies et en donnant comme résultats d'indicateurs environnementaux. Les saisies demandées concernent les quantités et la distance de transport des composants des produits, et le nombre de jours des engins utilisés. Concernant aux résultats, SEVE utilise d'indicateurs environnementaux qu'il considère les plus importants dans le domaine routière. Tenant compte du contexte du projet, on prendra seulement en compte que les suivants indicateurs: la consommation en énergie comparée, en MJ; les émissions de Gaz Effet Serre (GES), en tonnes CO2 équivalentes; et la tonne kilomètre, en t.km, au cas où il faut bien analyser l'impact de la distance. Les considérations que j'ai pris pour ces indicateurs seront expliquées plus en détail.

⁶ Aide au choix des granulats pour chaussées basée sur les normes européennes (2013). Note d'information n° 24. Paris: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.

Il est donc nécessaire de récolter les données relatives à mon étude dont SEVE a besoin.
Il est indispensable également de bien préciser mon unité fonctionnelle.

3.1. Cadre du projet

L'unité fonctionnelle choisie est le m^2 d'ECF :

- C'est l'unité utilisée par PROBINORD dans sa démarche industrielle.
- Elle tient compte du résultat final, c'est à dire, de la surface totale que recouvre l'ECF une fois mis en œuvre.
- Vis à vis du client et pour comparer des techniques cette unité est la plus représentative: pour un chantier donné, le client demande un revêtement pour une surface donnée et quelle que soit la technique, c'est toujours la même surface qui sera recouverte.

Cependant, dans le logiciel les données d'entrée de matières premières sont demandées en *Tonnes*, j'ai donc converti les m^2 en *tonnes* à partir de leur densité en tenant compte des granulats utilisés.

Il est à noter que pour les ECF, Probinord utilise un dosage en kg/m^2 qui est fixe quels que soient les granulats utilisés. Pour mener au mieux mon étude dans le cadre de l'entreprise Probinord, j'ai analysé les types de chantiers réalisés sachant que l'usine de production d'émulsion était fixe et situé dans l'Essonne et que les granulats proviennent de la carrière la plus proche du chantier.

Il est à noter que les granulats utilisés dans les ECF sont sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques et que le nombre de carrières potentielles est limité.

Probinord m'a ainsi fourni trois cas possibles de chantier (sur la France) qui diffèrent par leur distance à l'usine et à la carrière.

- Chantier 1 en **Essonne**: Proche de l'usine - éloigné de la carrière
- Chantier 2 dans le Calvados (**Falaise**): Éloigné de l'usine - proche de la carrière
- Chantier 3 dans les Landes (**Magescq**): Loin de l'usine - loin de la carrière

La comparaison sera menée au niveau des ECF entre eux mais aussi avec des BBTM.

Dans le cas des BBTM, j'ai émis l'hypothèse qu'ils étaient formulés avec de granulats de la même carrière que les ECF. Les granulats pour les ECF conviennent parfaitement pour les BBTM.

Les données précises sont présentées dans les hypothèses.

3.2. Les différentes étapes de la réalisation d'un ECF

Afin de prendre en compte tous les paramètres qui impactent potentiellement l'environnement, j'ai établi un synopsis retraçant le cheminement d'un ECF, de sa mise en œuvre sur le chantier à sa fabrication et donc à l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication.

Le détail de ce synopsis figure en Annexe 4.

Un schéma simplifié figure ci-dessous (Schéma 4)

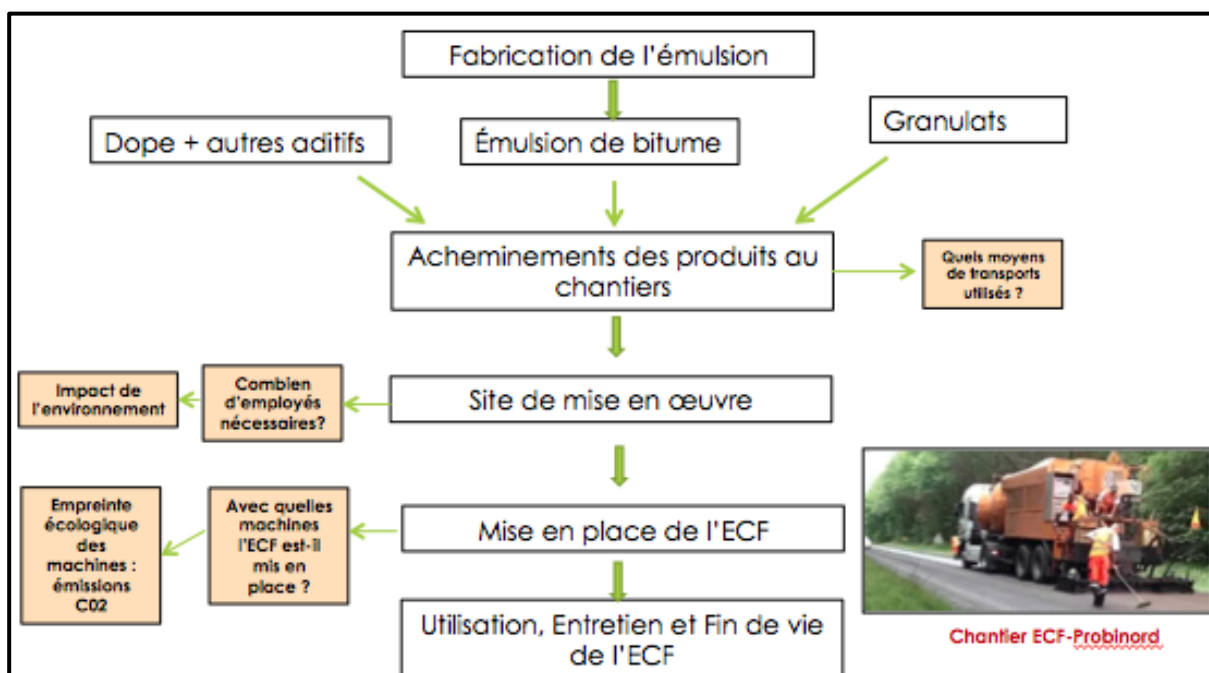


Schéma 1: Cheminement d'un ECF

Il a été établi qu'il fallait considérer l'impact de l'acheminement des granulats de la carrière au chantier et aussi de celui de l'émulsion de bitume de l'usine de Probinord au chantier.

La dernière phase du schéma "Utilisation, entretien et fin de vie de l'ECF" n'est pas pris en compte car son impact environnemental est très difficile à analyser et encore plus difficile à chiffrer. En outre, le logiciel SEVE s'arrête à la mise en œuvre et ne prend pas en compte cette dernière phase.

L'aspect "employés nécessaires" est intégré dans les calculs de SEVE, donc il ne fallait pas récolter des informations extra sur cet aspect.

Pour la suite de l'étude il est nécessaire de définir avec Probinord les moyens de transport qu'ils utilisent pour leur émulsion et les granulats ainsi que la dope et l'eau, leur atelier de mise en œuvre classique et leur organisation de chantier en fonction des trois cas (Annexes 1 et 2).

Des données ont également été récoltées sur les consommations énergétiques au niveau de l'usine d'émulsion d'Etampes et des machines ECF de Probinord. (Annexe 3 et Tableau 16).

3.3. Hypothèses choisies

3.3.1. Données nécessaires pour SEVE

L'analyse environnementale de SEVE s'effectue dans un projet consistant en une comparaison avec diverses solutions.

Une solution peut être une couche de chaussée ou une structure de chaussée composée de plusieurs couches.

Pour chaque solution, il convient de définir le détail des opérations en indiquant:

- les produits entrants
- les engins
- les produits sortants

Les figures 5 et 6 présentent un exemple des saisies nécessaires:

Détail de l'opération

Produits entrants Engins Produits sortants

Ajouter Appliquer





















Produit	Editer	Transport	Distance (KM)	Doublé Fret	Transport multimodal	Unité d'oeuvre	Quantité	Supprimer
 Ciment CEM II		Transport par camion 9t	40 *			Tonne	1 *	
 Eau		Transport par citerne 24t	10 *			Mètre cube	33 *	
 Emulsion 60%		Transport par citerne 24t	297 *			Tonne	46 *	
 Graviillons (granulats naturels)		Transport par camion 30t	13 *			Tonne	375 *	

Figure 5: Exemple de saisies pour un ECF sur SEVE (produits entrants)

Détail de l'opération

Produits entrants Engins Produits sortants

Ajouter Appliquer




Engin	Nombre de jours
 Balayeuse aspiratrice	2.4 *
 Camion 6/4 14 T	2.4 *
 Machine ECF	0.84 *

Figure 6: Exemple de saisies pour un ECF sur SEVE (engins)

Il convient donc de se fixer de données précises, à savoir pour un produit entrant: le type de produit / son moyen de transport avec distance / la quantité transportée. L'atelier de mise en œuvre doit aussi être parfaitement défini (nombre de jours nécessaires pour réaliser le chantier).

Nota: les points verts indiqués à côté des données signalent l'utilisation de données fournies par SEVE et non par l'utilisateur.

3.3.2. Hypothèses à paramètres fixes ECF

Les matériaux

Les quantités de matières premières et d'émulsion ont été calculées à partir de la formule d'ECF de Probinord (Annexe 1 et 2)

Cette formulation a été fournie par Probinord en 2014 à l'occasion du stage d'Oscar Sanou [6]. Elle a été établie pour une étude de laboratoire et indique donc l'eau de

mouillage et le sable sec. Pour utiliser cette formulation dans mon cas d'étude de chantier dans SEVE :

1. J'ai ajouté l'eau de mouillage au sable pour raisonner sur un sable naturel humide;
2. J'ai dû négliger l'impact du dope, car je ne disposais pas de données environnementales dessus;
3. J'ai utilisé la même formulation d'ECF pour tous mes chantiers. Donc, mes 3 chantiers ayant les mêmes dimensions, j'aurai la même quantité d'ECF.

L'atelier ECF

Les machines ont un impact environnemental très important lors de la mise en œuvre de l'ECF. Leur consommation énergétique ne peut pas être négligée, si bien que SEVE demande comme donnée d'entrée les machines de l'atelier ECF mis en place sur les chantiers que j'étudie.

Probinord m'a donné les caractéristiques de sa machine ECF, qui est son modèle le plus récent, et qui est sa référence. Cette machine est hors tracteur (il faudra ajouter les caractéristiques de celui-ci). Les caractéristiques se trouvent dans *l'Annexe 3*. Avec l'aide d'Ismail CAVAGNOL de l'USIRF, j'ai chiffré la consommation des machines utilisées par Probinord afin de la comparer à celle des machines de SEVE (Tableau 16).

Dans un premier temps, j'ai utilisé les données des machines de la bibliothèque de SEVE en respectant la composition de l'atelier de mise en œuvre sur les chantiers de Probinord.

Les données personnalisées de la machine ECF seront analysées dans une étude ultérieure plus détaillée pour bien analyser l'importance de la machine ECF sur le bilan de l'impact environnemental.

L'atelier ECF de Probinord se compose d'une balayeuse aspiratrice, pour balayer la surface avant d'y étaler l'ECF, et d'une machine ECF, qui mélange l'émulsion avec les granulats et la dope et ensuite étale l'ECF sur la surface. Probinord n'utilise pas d'atelier de compactage sur ses chantiers, le compactage se réalisant avec la remise du trafic.

De plus, il n'y a pas de balayage après la mise en place de l'ECF car il n'y a pas de granulats détachés à balayer.

Données entrées:

- Une balayeuse aspiratrice
- Un camion 14t
- Une machine ECF

Les chantiers

Les 3 cas de chantiers considérés ont les mêmes dimensions (largeur et longueur). Celles-ci ont été définies avec Probinord comme représentatives d'un chantier moyen:

- Longueur : 1,5 km
- Largeur : 6 m
- Dosage : 20 kg/m² en bicouche
- Préparation du support : aucune

Je suis parti de l'hypothèse qu'un chantier d'ECF et un chantier BBTM nécessitent la même préparation de support et que cette préparation apportait le même impact; c'est pourquoi la préparation du support n'est pas considérée permettant de simplifier l'étude.

Compte tenu de ces informations j'ai calculé les quantités de matériaux nécessaires et son transport au chantier, obtenu de la base de données de SEV, qui sont résumés ci-après:

Formule ECF :		pour 455t d'ECF (en t)	Type transport
Sable	82.3%	375	camion 30t
Émulsion de bitume 60% ECF	9.9%	46	citerne 24t
Eau d'apport	7.2%	33	citerne 24t
Ciment CEM II	0.6%	1	camion 9t

Tableau 3: Récapitulatif des quantités de matières premières nécessaires pour 455 tonnes d'ECF

3.3.3. Hypothèses à paramètres variables ECF

Ces hypothèses résultent des différentes localisations de mes 3 cas de chantiers sur la France. Ils sont géographiquement répartis comme ci-dessous sur la carte.

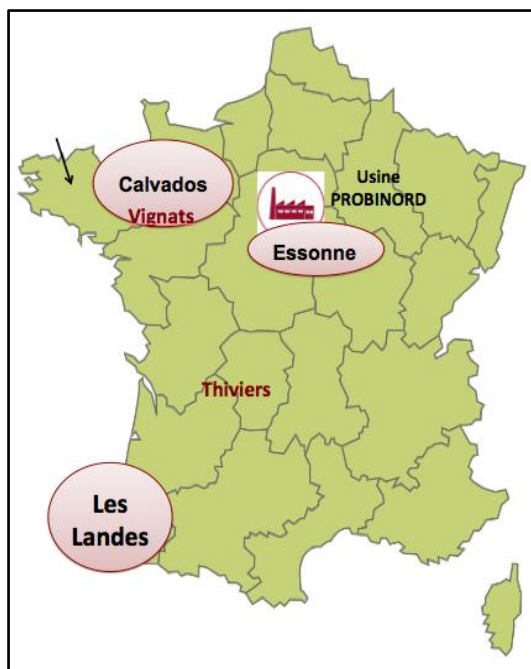


Figure 7: Localisation des 3 cas de chantiers

Je rappelle que ces 3 cas ont été choisis car Probinord possède une seule usine en Essonne, à Méréville, tandis que son activité se déroule sur toute la France Métropolitaine. Comme je l'avais remarqué, l'émulsion doit être transportée sur tous les chantiers que Probinord a en charge en France.

Probinord choisit des carrières au plus proche de ses chantiers pour limiter le transport. Cela conduit ainsi à définir les carrières suivantes:

- Vignats pour les chantiers en Essonne et Calvados.
- Thiviers pour le chantier dans Les Landes.

Il est à noter que compte tenu de l'exigence des caractéristiques des granulats pour les ECF, les carrières peuvent également être éloignées du chantier, comme par exemple le cas 3, dans Les Landes avec la carrière à Thiviers à 308 km du chantier; c'est pourquoi

il est vraiment important de prendre en compte le transport des granulats dans mon analyse pour bien mesurer l'impact de celui-ci par rapport à l'impact du transport de l'émulsion.

Le tableau 4 résume les distances prises en compte dans mes 3 cas de chantiers.

Localisation chantier	Distance à l'usine Probinord (km)	Distance à la carrière Vignats (km)	Distance à la carrière Thiviers (km)
Cas 1 : Essonne	20	225	X
Cas 2 : Falaise	297	13	X
Cas 3 : Magescq	660	X	308

Tableau 4: Tableau récapitulatif des distances

3.3.4. Hypothèses pour les BBTM

Transport des matériaux:

Un BBTM est composé de bitume et granulats et se fabrique à chaud en un poste d'enrobage (contrairement à l'ECF qui se fabrique sur chantier).

J'ai cherché de postes d'enrobage qui soient le plus proche du chantier. Par ailleurs, il faut fournir du bitume pour la fabrication des enrobés. Aussi, j'ai cherché des raffineries le plus proches possibles des postes d'enrobage. Il faut remarquer que les matériaux ne sont pas transportés directement au chantier comme les ECF, mais qu'ils doivent être transportés aux postes d'enrobage et une fois le BBTM est fabriqué celui-ci est transporté au chantier.

Pour les granulats, je rappelle que j'ai choisi les mêmes carrières que celles des ECF. Comme j'ai présenté auparavant, les exigences selon la norme sont pareilles pour les granulats des ECF que pour ceux des BBTM, donc cette hypothèse est déjà vérifiée.

Le tableau 5 présente un récapitulatif des distances.

Chantiers	Distance usine Probinord	Carrière Vignats	Carrière Thiviers	Nom Centrale	Distance centrale/ chantier	Distance carrière/ centrale
Essonne	20	225	X	Colas Etampes	26	240
Falaise	297	13	X	Vignats	13	0
Magescq	660	X	340	GME Labatut	41	340

Tableau 5: Récapitulatif des distances parcourues

L'atelier de mise en œuvre est composé de:

- On prend pour la couche d'accrochage une émulsion de bitume de liant résiduel 300 g/m².
- On prend un atelier de mise en œuvre de moyenne cadence directement de SEVE (700 t/jour).

Les dimensions sont identiques pour les trois chantiers mais à différence des ECF, on n'applique pas le même dosage mais une même épaisseur de mise en œuvre. Les matériaux ne proviennent pas de la même carrière et donc la masse volumique des granulats est variable. J'aurai donc des quantités variables de BBTM pour les différents chantiers.

Les chantiers

Les 3 cas de chantiers considérés ont les mêmes dimensions (Largeur et longueur) comme dans les hypothèses des ECF:

- Longueur : 1,5 km
- Largeur : 6 m

- Dosage : 20 kg/m² en bicouche
- Préparation du support : aucune

Comme avec les ECF, et pour les mêmes raisons que j'avais expliquées, je ne considère pas la préparation du support.

3.4. Méthode d'analyse des résultats SEVE

SEVE quantifie l'impact environnemental d'un produit à partir de quatre indicateurs principaux, à savoir:

- La consommation d'énergie procédée
- Les émissions de GES
- La préservation de la ressource (scindée en 4 indicateurs)
- La tonne kilométrique

La consommation d'énergie procédée (exprimée en MJ) représente la somme des énergies renouvelables et non renouvelables utilisées lors de la réalisation de l'ouvrage.

Les émissions de GES (exprimées en tonne équivalente de CO₂) rendent compte de l'impact sur le changement climatique. Il tient compte des flux correspondant aux émissions des matériaux mise en œuvre mais aussi des transports et des opérations nécessaires. L'unité utilisée, la tonne équivalente de CO₂, sert à homogénéiser les différents gaz émis par rapport à son impact en prenant comme référence l'impact du CO₂.

La préservation de la ressource (exprimée par tonne) comptabilise les tonnes de matériaux consommées sur le chantier. Cela permet de mesurer les quantités de granulats naturels économisées.

La tonne kilomètre (exprimée par tonne.km) mesure la quantité de transport d'une tonne sur un kilomètre.

Dans un premier temps, j'ai retenu les indicateurs *la consommation d'énergie procédée*, *les émissions GES* et *la tonne kilomètre* parce que je les considère les plus représentatifs de mon projet. Je n'ai pas considéré l'indicateur *préservation de la ressource* parce que

tenant compte des produits traités (l'ECF et le BBTM) je considère peu significatif cet indicateur.

SEVE montre ses résultats en distribuant à chaque niveau du cycle de vie que SEVE contemple son impact environnemental, en utilisant les quatre indicateurs principaux décrits ci-dessus. La comparaison donc va être menée aux niveaux suivants:

- Matériaux
- Transport en amont
- Fabrication des mélanges
- Transport chantier
- Mise en œuvre

Le *Matériaux* correspond à l'impact de la production des matières premières du produit à comparer. Le *Transport en amont*, à l'impact de l'acheminement des produits à l'usine où le produit se fabrique. Puis, la *Fabrication des mélanges* inclut l'impact de la fabrication du produit en usine; le *Transport chantier*, l'impact du transport du produit ou de quelqu'un de ses composants au chantier; et finalement, la *Mise en œuvre* l'impact de celle-ci (l'impact des ateliers de mise en œuvre, par exemple).

L'ECF a la particularité qu'est fabriqué en chantier: tous ses composants (granulats, émulsion, eau, dope, ciment) sont amenés au chantier et puis mélanges pour obtenir l'ECF. Aussi, SEVE considère dans son niveau *Fabrication des mélanges* l'impact de la fabrication du produit en usine. Par contre, l'ECF est fabriqué intégralement sur site, si bien que tout l'impact de sa fabrication est pris en compte par SEVE dans le niveau *Mise en œuvre*. Cette particularité implique que les niveaux *Transport en amont* et *Fabrication des mélanges* apparaissent nuls pour les ECF. Par contre, le BBTM est fabriqué en usine, donc les niveaux *Transport en amont* et *Fabrication des mélanges* sont bien à prendre en compte. Alors, pour mieux comparer l'ECF et le BBTM j'ai regroupé le *Transport en amont* et le *Transport chantier* dans un même niveau *Transport*, et la *Fabrication des mélanges* et la *Mise en œuvre* dans un autre niveau *Fabrication+Mise en œuvre*.

4. Comparaisons des ECF entre eux

Pour évaluer l'impact de la distance du transport de l'émulsion venant de l'usine de Probinord, j'ai comparé la solution ECF des trois chantiers.

Je rappelle que sur les 3 chantiers, on fabrique et on met en œuvre les mêmes quantités et les mêmes surfaces d'ECF et donc a priori, je devrais obtenir les mêmes impacts au niveau « Matériaux » et « Fabrication + Mise en œuvre » .

La différence devrait porter donc principalement sur les différents impacts du transport.

4.1. Présentation des résultats

Les résultats obtenus et extraits de SEVE sont résumés dans les tableaux 6, 7 et 8.

Consommation comparées en énergie procédé (en MJ):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication</u> + <u>Mise en</u> <u>œuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	155 190,89	82 474,70	78 021,60	315 687,19
ECF Falaise	155 190,89	18 465,57	78 021,60	251 678,06
ECF Magescq	155 190,89	142 177,12	78 021,60	375 389,61

Tableau 6: Consommation comparée en énergie procédé dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en MJ)

Émissions totales en Gaz Effets Serre comparées (en t CO₂):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication</u> <u>+ Mise en</u> <u>œuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	8,93	6,64	6,16	21,74
ECF Falaise	8,93	1,49	6,16	16,58
ECF Magescq	8,93	11,45	6,16	26,55

Tableau 7: Émissions totales de GES dans les 3 cas de chantier pour l'ECF (en t.CO₂)

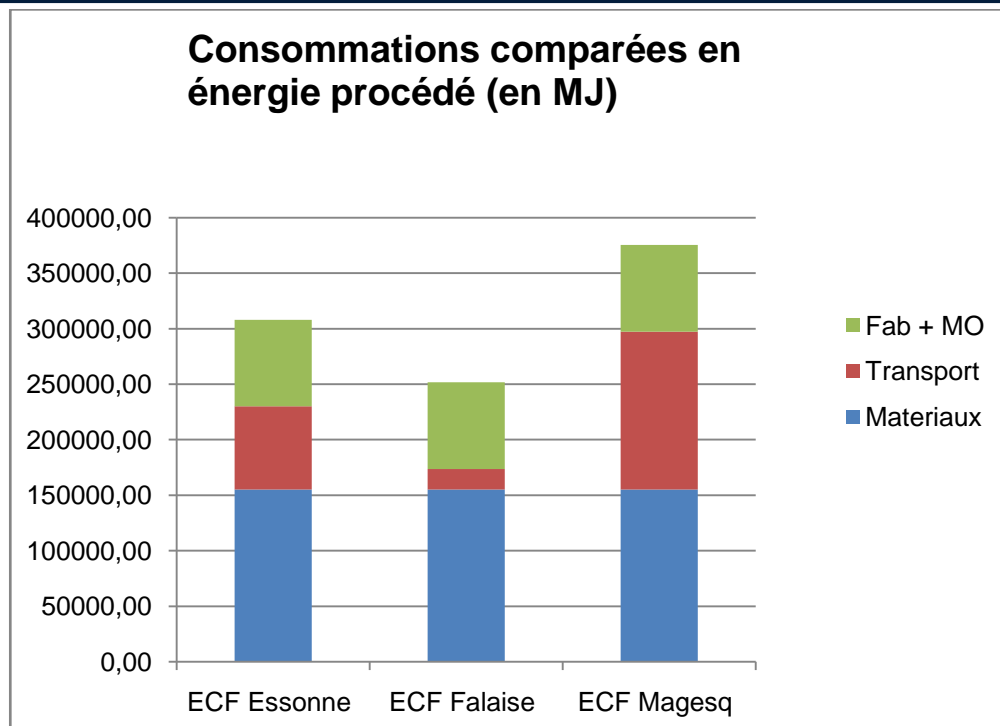
Tonne kilomètre (en t.km):

<u>Solution</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	93 225,00
ECF Falaise	18 907,00
ECF Magescq	158 225,00

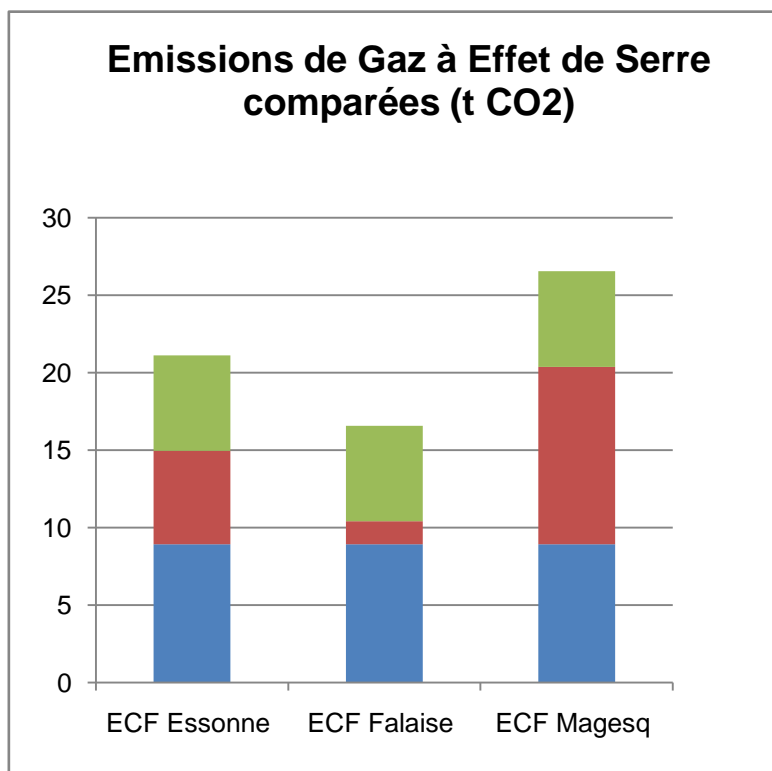
Tableau 8: Tonnes kilomètres dans les 3 cas de chantier (en t.km)

4.2. Influence du transport des matériaux

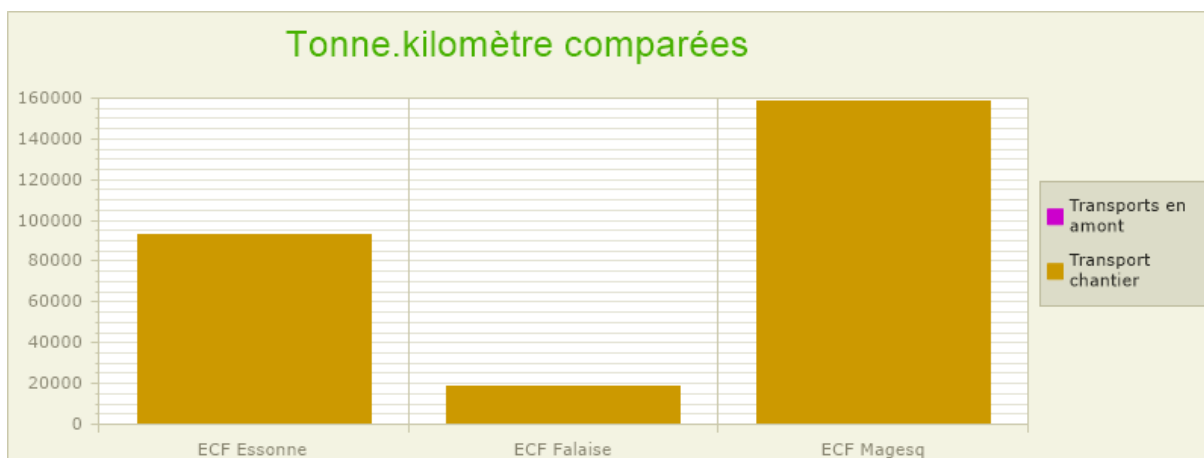
Pour interpréter mes résultats j'ai tracé d'histogrammes correspondant à chaque indicateur de SEVE. Ces histogrammes regroupent les niveaux comme j'ai déjà expliqué:



Graphique 1: Consommations comparées en énergie procédé d'ECF dans les trois cas de chantier (en MJ)



Graphique 2: Émissions de GES comparées dans les trois cas de chantiers (en t.CO₂)



Graphique 3: Tonnes kilomètres comparées d'ECF dans les trois cas de chantiers (t.km)

Le graphique 3 (Tonne.kilomètre) est naturellement la plus explicite : l'indicateur est la tonne.kilomètre; mes chantiers sont réalisés avec la même quantité de matériaux et Magescq, dans les Landes, est celui qui est le plus loin de l'usine de liant mais aussi de la centrale d'enrobage.

Les graphiques 1 et 2 montrent que, comme je l'attendais, les consommations d'énergie et les émissions de GES sont identiques pour mes trois chantiers, aux niveaux des *Matériaux* et de la *Mise en œuvre*, mais sont différents au niveau du *Transport* en fonction des chantiers. Premièrement, je constate que le plus impactant est le chantier de Magescq, étant cela évident parce que c'est le chantier le plus éloigné de l'usine et à sa carrière. Puis, on a le chantier d'Essonne comme le deuxième le plus impactant, malgré la proximité de l'usine. En effet, l'impact est beaucoup plus élevé que celui de Falaise (qui est 10 fois plus éloigné de l'usine que celui d'Essonne). Si je regarde la distance à la carrière, le chantier de Falaise est beaucoup plus proche de Vignats que le chantier d'Essonne.

J'ai calculé l'impact du transport de l'émulsion par rapport au transport des granulats. Les résultats sont présentés en Tableau 9.

	Part transport émulsion sur (1) et (2)	Part transport granulats	Part émulsion sur Total (1) et (2)	Part émulsion sur Total (2)
Chantier Essonne	11%	89%	2.8%	3.3%
Chantier Falaise	77%	23%	6.1%	7.6%
Chantier Magescq	22%	78%	8.3%	9.4%

Tableau 9: Comparaison quantitative de l'impact du transport de l'émulsion par rapport à celui des granulats

(1) Consommation d'énergie

(2) GES

A noter : la part transport « émulsion » par rapport au transport « granulat » est sensiblement identique que ce soit en consommation énergétique ou en GES.

On constate bien sûr que le transport de l'émulsion joue plus sur le transport global dans le cas de Falaise car les matériaux granulaires sont proches du chantier.

Par contre si on calcule l'impact du transport émulsion seul sur les deux indicateurs choisis, on note un impact maximal de 10% .

Alors, on conclue que l'impact du transport des granulats est beaucoup plus élevé que celui de l'émulsion. Cela n'est pas étonnant car on transporte beaucoup plus de tonnes de granulats que d'émulsion.

5. Comparaisons des ECF avec les BBTM

J'ai comparé les ECF avec une autre technique d'entretien de chaussées. Cette technique est le Béton Bitumineux Très Mince (BBTM), présenté dans la partie bibliographique et qui a des caractéristiques techniques comparables à celles des ECF ce qui fait en pratique des techniques concurrentielles.

Cette comparaison permettra de mesurer la différence de l'impact environnemental de ces deux techniques et de positionner ainsi l'ECF.

Les hypothèses sur les BBTM ont été présentées précédemment.

5.1. BBTM Classique

D'abord, j'ai comparé les ECF avec les BBTM les plus courants, que SEVE appelle "BBTM Classiques". Ceux-ci sont fabriqués à chaud aux alentours de 180 °C, et c'est cette caractéristique laquelle à priori impliquera que l'impact environnemental des BBTM soit plus élevé que celui des ECF. En suite, on a chiffré cette différence avec l'outil SEVE.

5.1.1. Présentation des résultats

J'ai présenté les résultats dans les tableaux 10, 11 et 12.

Consommations comparées en énergie procédé (en MJ):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication + Mise en oeuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	155 190,89	74 808,04	78 021,60	308 020,53
BBTM Essonne	125 605,03	1020742,9	118743,84	365 091,76
ECF Falaise	155 190,89	18 465,57	78 021,60	251 678,06
BBTM Falaise	125 605,03	18359,48	118743,84	262 708,34
ECF Magescq	155 190,89	142 177,12	78 021,60	375 389,61
BBTM Magescq	129 265,85	174532,67	122161,62	425 960,14

Tableau 10: Comparaison de la consommation en énergie procédé pour l'ECF et un BBTM Classique sur les trois chantiers

Émissions Totales de Gaz à Effet de Serre comparées (t CO₂e):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication + Mise en oeuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	8,93	6,03	6,16	21,12
BBTM Essonne	7,53	9,72	9,63	26,88
ECF Falaise	8,93	1,49	6,16	16,58
BBTM Falaise	7,53	1,47	9,63	18,64
ECF Magescq	8,93	11,45	6,16	26,55
BBTM Magescq	7,75	14,05	9,91	31,71

Tableau 11: Comparaison des émissions de GES pour l'ECF et un BBTM Classique sur les trois chantiers

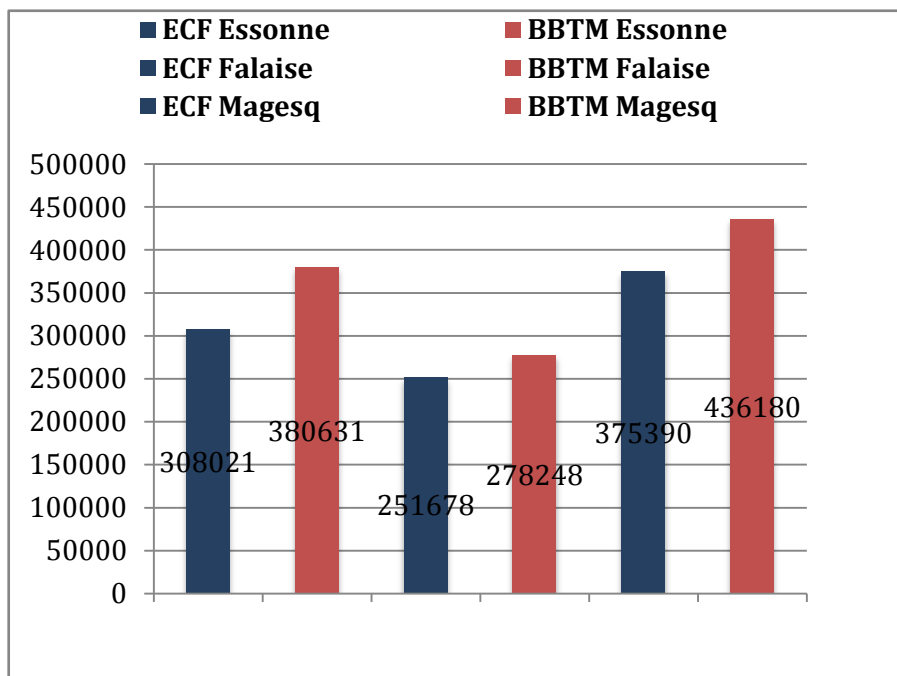
Tonne kilomètre (en t.km):

<u>Solution</u>	<u>Total</u>
ECF Essonne	85 635,00
BBTM Essonne	121 160,00
ECF Falaise	18 907,00
BBTM Falaise	20 675,00
ECF Magescq	158 225,00
BBTM Magescq	175 844,00

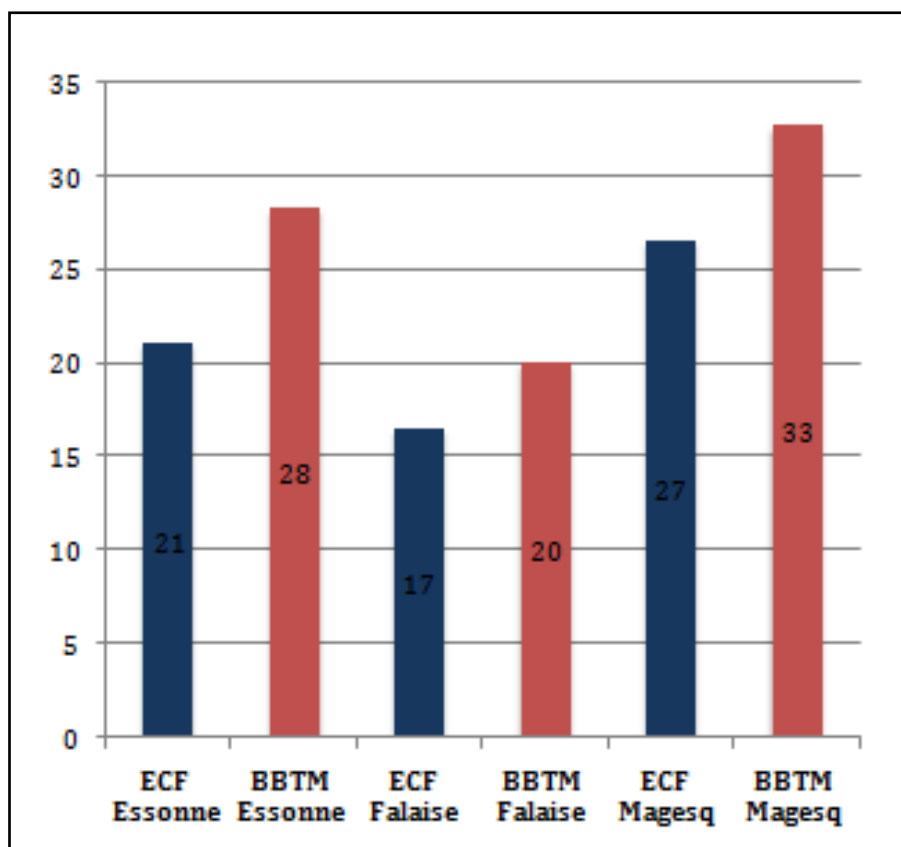
Tableau 12: Comparaison des tonnes kilomètres pour l'ECF et un BBTM Classique sur les trois chantiers

5.1.2. Interprétation des résultats

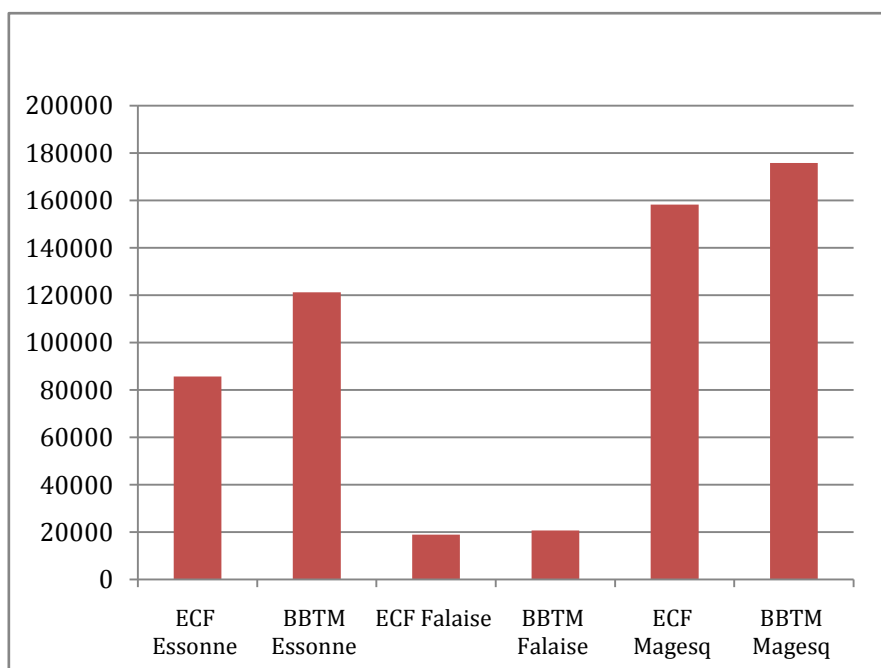
J'ai utilisé les histogrammes (graphiques 4, 5 et 6) pour mieux interpréter les résultats:



Graphique 4: Consommation comparée en énergie procédé pour l'ECF et un BBTM Classique dans les trois cas de chantier (en MJ)



Graphique 5: Émissions Totales de GES pour l'ECF et un BBTM Classique dans les trois cas de chantier (en t.CO₂)



Graphique 6: Tonne kilomètre pour l'ECF et le BBTM Classique pour les trois cas de chantiers (en t.km)

On regarde que pour tous les chantiers, l'ECF reste plus écologique que le BBTM. Cela c'est parce que l'impact de la fabrication du BBTM est beaucoup plus impactant que celui des ECF. En plus, il n'y a pas d'avantage pour le BBTM par rapport au transport car les matériaux doivent être amenés au poste d'enrobage et puis au chantier, dépensant ainsi l'avantage que les BBTM avaient sur les ECF (qui doivent amener leur émulsion de l'usine de Probinord). Le cas de chantier où la différence d'impact est la plus faible est Falaise. C'est aussi le cas où l'impact de la distance est la moins important. On y peut constater donc la différence des impacts à cause de la fabrication des mélanges.

5.2. BBTM Tièdes

Les BBTM Tièdes sont des BBTM Classiques qui sont fabriqués à températures plus basses (entre 100 et 150 °C). Pour la comparaison de l'impact du BBTMT par rapport à celui du BBTM Classique et de l'ECF, on s'intéressera au cas de Falaise car c'est le cas où la différence d'impact entre le BBTM Classique et l'ECF est la plus faible. Il faut noter que même si théoriquement les BBTM Tièdes sont plus intéressants d'un point de vue environnemental, en pratique ils sont plus complexes à fabriquer que les Classiques. En effet, leur viabilité est mise en doute car la maîtrise du mélange est instable sous température basse.

5.2.1. Présentation des résultats

On utilise les tableaux 13, 14 et 15 pour représenter les résultats.

Consommations comparées en énergie de procédé (en MJ):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication + Mise en oeuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Falaise	155 190,89	18 465,57	78 021,60	251 678,06
BBTM Falaise	125 605,03	18 359, 48	118 743, 84	262 708,34

Tableau 13: Consommation comparée en énergie procédé pour l'ECF et un BBTM Tiède dans le cas de Falaise (en MJ)

Emissions Totales de Gaz à Effet de Serre comparées (t CO₂e):

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication + Mise en oeuvre</u>	<u>Total</u>
ECF Falaise	8,93	1,49	6,16	16,58
BBTM Falaise	7,53	1,47	9,63	18,64

Tableau 14: Émissions Totales de GES pour l'ECF et un BBTM Tiède dans le cas de Falaise (en t.CO₂)

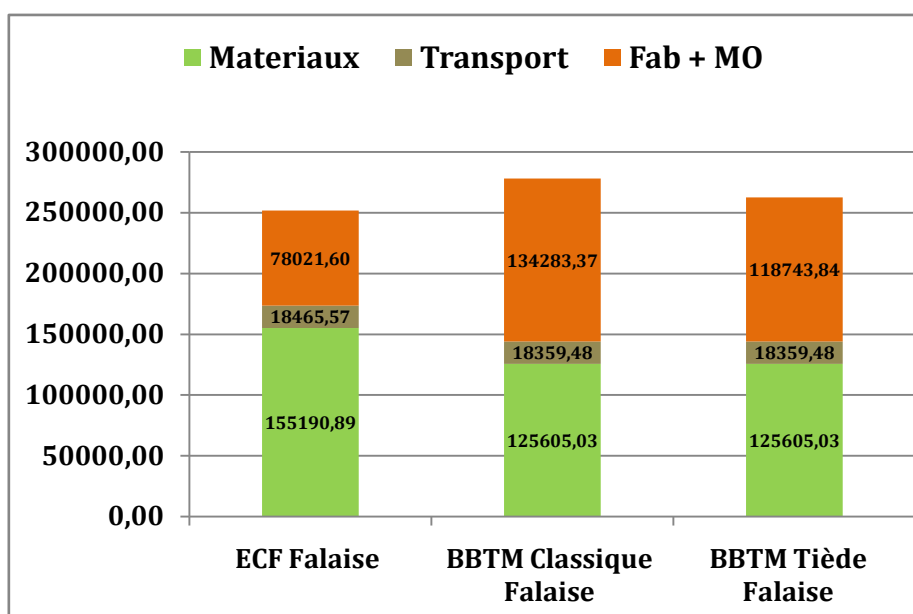
Tonne kilomètre (en t.km):

<u>Solution</u>	<u>Transport</u>	<u>Total</u>
ECF Falaise	18 907,00	18 907,00
BBTM Falaise	20 675,00	20 675,00

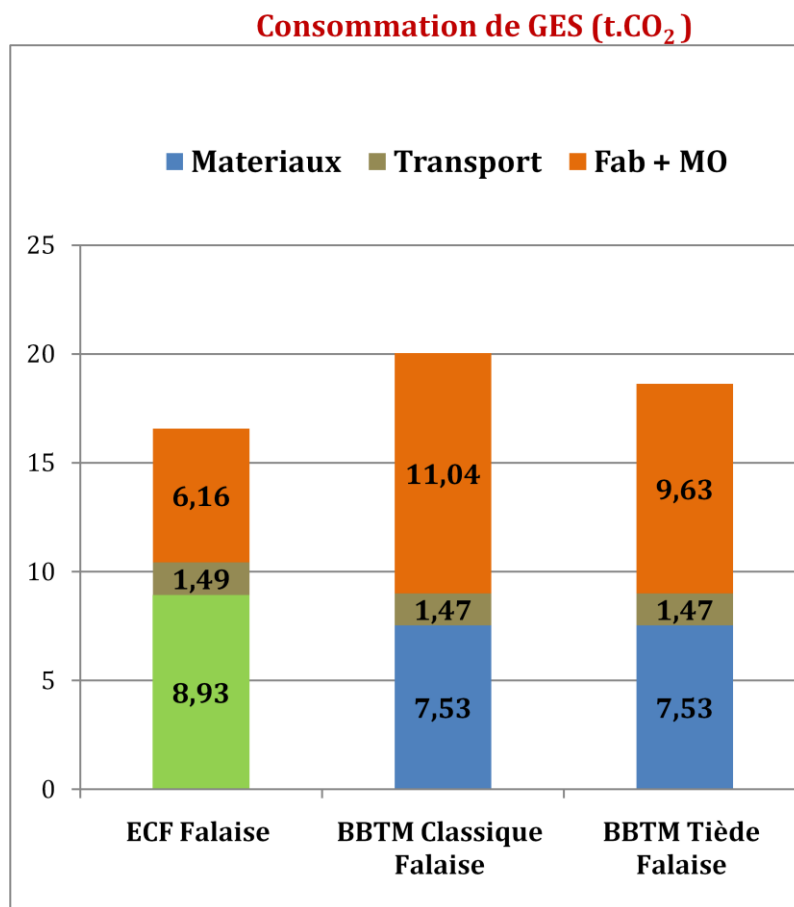
Tableau 15: Tonne kilomètre pour l'ECF et un BBTM Tiède dans le cas de Falaise (en t.km)

5.2.2. Interprétation des résultats

J'utilise les graphiques 7 et 8 pour interpréter les résultats, où j'ai ajouté aussi le BBTM Classique de Falaise pour mieux analyser l'impact du BBTM Tiède.



Graphique 7: Consommation comparée en énergie procédée pour l'ECF, un BBTM Classique et un BBTM Tiède dans le cas de Falaise (en MJ)



Graphique 8: Émissions Totales de GES pour l'ECF, un BBTM Classique et un BBTM Tiède dans le cas de Falaise (en t.CO₂)

Avec ces deux graphiques, on peut constater que le BBTM Tiède est moins impactant que le BBTM Classique, mais qu'il reste plus impactant que l'ECF. Cela est due à la baisse de l'impact dans la fabrication et mise en œuvre car on fabrique à une température plus basse que celle des BBTM Classiques. On peut regarder aussi que par rapport au transport les BBTM ne varient pas, étant ce résultat très significatif car c'est dans le transport des granulats où on a les plus grandes variations. Si à cela on ajoute le fait que la baisse de température de fabrication des BBTM qu'on atteint ne suffit pas pour être moins impactant que l'ECF, on peut conclure que les BBTM seulement peuvent être moins impactant si on a une carrière tellement située que le transport des granulats des ECF est très défavorable pour les ECF. Cependant, il faut remarquer les hypothèses sur les carrières que j'avais pris: ce n'est pas impossible de trouver une carrière pour les BBTM mieux située que celle des ECF car j'ai utilisé les carrières que Probinord m'a fourni, pouvant être celles-ci choisies par plusieurs raisons que pas

seulement sa proximité au chantier. J'étudierai ultérieurement s'il y a de carrières plus proches au chantier pour les BBTM que celles que Probinord a choisi.

Alors, on peut dire qu'avec la technique du BBTM Tiède les différences avec l'ECF diminuent mais l'ECF reste encore plus écologique dans les trois indicateurs étudiés (*Consommations en énergie de procédé, Émissions Totales de GES et la Tonne kilomètre*).

6. Approfondissement sur les données de Probinord

Ayant comparé les ECF avec les BBTM avec une hypothèse que n'étaient pas exhaustives par rapport au contexte de Probinord, j'ai actualisé les hypothèses de calcul pour mieux caractériser ce scénario à la problématique de l'entreprise et puis j'ai comparé à nouveau les deux techniques. Ces actualisations sont la introduction de la machine ECF de Probinord et le changement de carrière dans le cas de Magescq pour les BBTM.

6.1. Actualisation des Hypothèses

6.1.1. Introduction de la machine ECF de Probinord

Comme j'avais déjà expliqué, dans les premiers calculs j'avais utilisé la machine ECF par défaut de SEVE pour mieux analyser après l'importance de celle-ci. Désormais, pour mieux adapter le scénario aux besoins de Probinord j'incorpore dans les calculs la machine ECF de Probinord.

Pour introduire la machine ECF de Probinord, j'ai eu besoin de l'aide d'Ismaël CAVAGNOL, qui m'a indiqué les données de la machine dont il avait besoin pour me personnaliser mon compte SEVE avec la machine ECF de Probinord. J'ai transmis ces données à Probinord, et ils m'ont répondu avec ses données. Tout suite, j'ai envoyé ces données à Ismaël et il m'a envoyé une grille des consommations (Tableau 15) de la machine par rapport à la machine ECF par défaut de SEVE, même si Probinord ne m'a pas fourni toutes les données que Ismaël m'avait demandé.

		TOTAL (par heure d'utilisation)			TOTAL (par jour d'utilisation)		
		Unité	ENERGIE (MJ)	CO2 (TCO2eq)	Unité	ENERGIE (MJ)	CO2 (TCO2eq)
EC100	Machine ECF (SEVE)	heure	1784	0,1398	jour	12485	0,9785
	Machine ECF (Probinord)	heure	560	0,0425	jour	4482	0,3403
	Machine ECF (Probinord)	heure	560	0,0425	jour	6723	0,5104

Tableau 16: Table avec les consommations de la machine ECF de SEVE et la machine ECF de Probinord

Puis, j'ai examiné la grille et j'ai constaté qu'en tous les paramètres le rapport de la machine ECF de SEVE sur la machine ECF de Probinord était de 2.85. Alors, j'ai pensé à introduire la machine ECF de Probinord dans le logiciel SEVE en utilisant la machine par défaut de SEVE mais en réduisant son nombre de jours d'utilisation par le même rapport que j'avais trouvé dans la grille d'Ismaël (2.85). J'ai averti qu'apparemment le nombre de jours d'utilisation garde un rapport linéal avec la consommation énergétique et de GES de la machine. Quand même, cela n'était qu'une hypothèse, donc j'ai demandé à nouveau à Ismaël si ce rapport est effectivement linéale. Il m'a répondu que oui, donc j'ai préservé ce rapport pour la suite des calculs.

En résumé, si je réduis le nombre de jours d'utilisation de la machine par 2.85 on obtient un impact que c'est équivalent à introduire la machine ECF de Probinord à l'atelier initial. Cette réduction s'observe exclusivement dans la partie *Mise en œuvre* des résultats de SEVE.

6.1.2. Changement de la carrière pour les BBTM de Magescq

J'avais introduit l'hypothèse que les carrières des BBTM étaient les mêmes carrières que celles qu'on utilisait pour les ECF. Avec cette hypothèse, j'ai négligé l'existence des carrières qui soient plus proche au chantier pour les BBTM. Ainsi, j'ai beaucoup limité les BBTM dans les comparaisons en imposant que ses carrières soient les mêmes que celles de Probinord, étant celles-ci un choix pas purement environnemental mais aussi économique, technique, etc.

Comme j'avais déjà expliqué, le transport des granulats a l'impact le plus important dans le bilan global environnemental. C'est pour cela que c'est impératif que je peaufine le plus possible la distance des granulats des BBTM pour avoir une comparaison la plus réelle possible. Premièrement, j'ai recherché les prestations exigées pour la norme: étant les carrières des ECF déjà fixées, je me suis centré sur les exigences des granulats des BBTM pour voir s'ils étaient plus ou moins exigeantes que ceux des ECF. Après, auprès des résultats obtenus de ma recherche sur l'exigence des granulats, j'ai recherché une carrière plus performante dès point de vue environnemental pour les BBTM afin de représenter un scénario plus réaliste.

Comme j'ai déjà constaté, les exigences des granulats sont pareilles pour ceux des BBTM et ceux des ECF. Alors, je peux chercher des carrières qui soient plus favorables dès point de vue environnemental pour les BBTM. On a laissé les carrières des ECF fixées à cause qu'elles font partie du scénario fourni par Probinord.

- Cas d'Essonne: la carrière d'ECF provient du Calvados (Vignats) car on n'a pas de carrières en Île-de-France. Pareillement, les carrières pour les BBTM devraient être dehors de l'Île-de-France, donc que c'est inutile de chercher une carrière exclusivement pour les BBTM en tenant compte que la différence de distance entre celle-ci et celle des ECF sera négligeable. J'ai choisi donc de préserver la carrière de Vignats pour les BBTM dans le cas d'Essonne.
- Cas de Falaise: Comme que la carrière est à coté du chantier, c'est pratiquement impossible trouver une carrière qui soit plus favorable pour les BBTM que celle de Vignats, que c'est aussi la carrière utilisée par Probinord pour ses ECF.

- Cas de Magescq: C'est ici où on se rend compte que la distance entre la carrière des ECF, située à Thiviers, et le chantier de Magescq est très grande (340 km). Cette distance ouvre la possibilité de trouver une carrière plus favorable environnementalement pour les BBTM. Et effectivement, j'ai trouvé une carrière de SEMEX à Labatut, juste à côté de la centrale d'enrobage des BBTM qu'on utilise pour comparer avec les ECF, et qui atteint les exigences pour les granulats de la norme⁷. Ainsi, on élimine pratiquement la distance entre les granulats des BBTM et la centrale d'enrobage (nommée *Transport en Amont en SEVE*).



Figure 8: Carrière SEMEX à Labatut

6.2. Résultats avec les hypothèses actualisées

6.2.1. Présentation des résultats:

On utilise les tableaux du 17 au 22 pour représenter les résultats.

⁷ SEMEX. *Fiche technique carrière de Labatut*. < http://www.cemex.fr/file/Fiche_Labatut_2014_VF.pdf > [Consulté le 7/09/2016]

Consommations comparées en énergie de procédé (en MJ):

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +Mise en œuvre	Total
ECF Magescq	155 190,89	142177.12	58545.00	355 913,01
BBTM Magescq	129 265,85	21604.00	136213,45	289 083,29

Tableau 17: Consommation comparée en énergie procédé de l'ECF et un BBTM Classique au chantier de Magescq (en MJ)

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +Mise en oeuvre	Total
ECF Falaise	155 190,89	18465,57	58 545,00	232 201,46
BBTM Falaise	125 605,03	18359,48	134 283,34	278 247,88

Tableau 18: Consommation comparée en énergie procédé de l'ECF et un BBTM Classique au chantier de Falaise (en MJ)

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +Mise en oeuvre	Total
ECF Essonne	155 190,89	82 474,70	58 545,00	296 210,59
BBTM Essonne	125 605,03	120 742,90	134 283,37	380 631,29

Tableau 19: Consommation comparée en énergie procédé de l'ECF et un BBTM Classique au chantier d'Essonne (en MJ)

Emissions Totales de Gaz à Effet de Serre comparées (t CO₂e):

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +Mise en œuvre	Total
ECF Magescq	8,93	11,45	4,63	25,02
BBTM Magescq	7,75	1,74	11,37	20,86

Tableau 20: Émissions Totales comparées de GES de l'ECF et un BBTM Classique au chantier de Magescq (en t.CO₂)

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication +Mise en œuvre	Total
ECF Falaise	8,93	1,49	4,63	15,05
BBTM Falaise	7,53	1,47	11,04	20,05

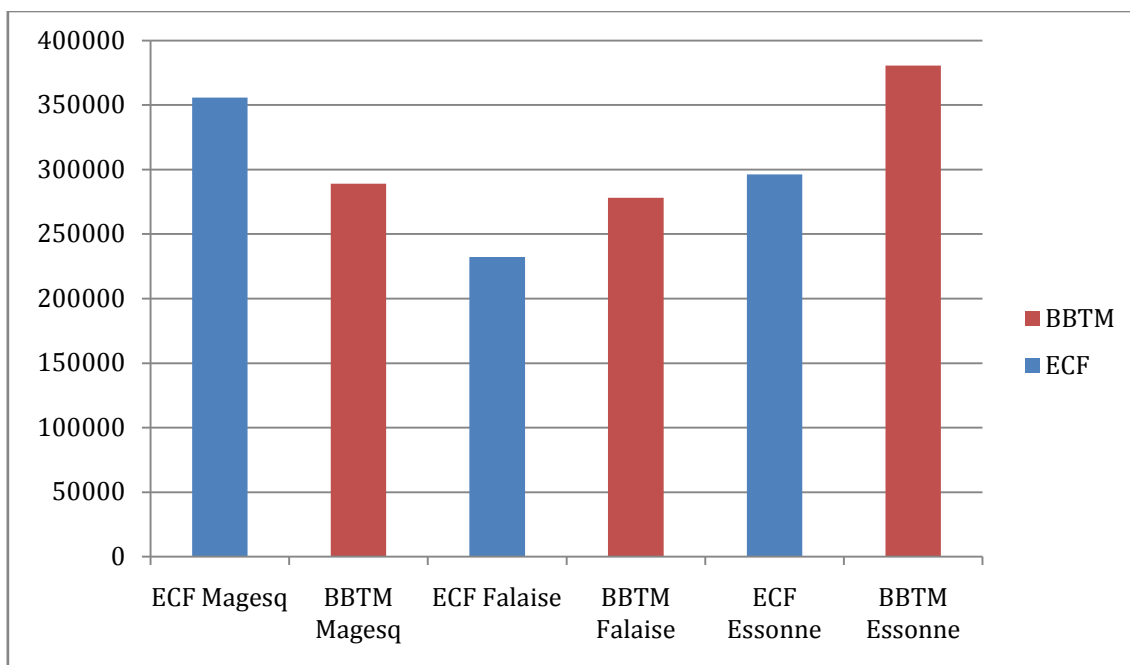
Tableau 21: Émissions Totales comparées de GES de l'ECF et un BBTM Classique au chantier de Magescq (en t.CO₂)

Solution	Matériaux	Transport	Fabrication + Mise en œuvre	Total
ECF Essonne	8,93	6,64	4,63	20,21
BBTM Essonne	7,53	9,72	11,04	28,29

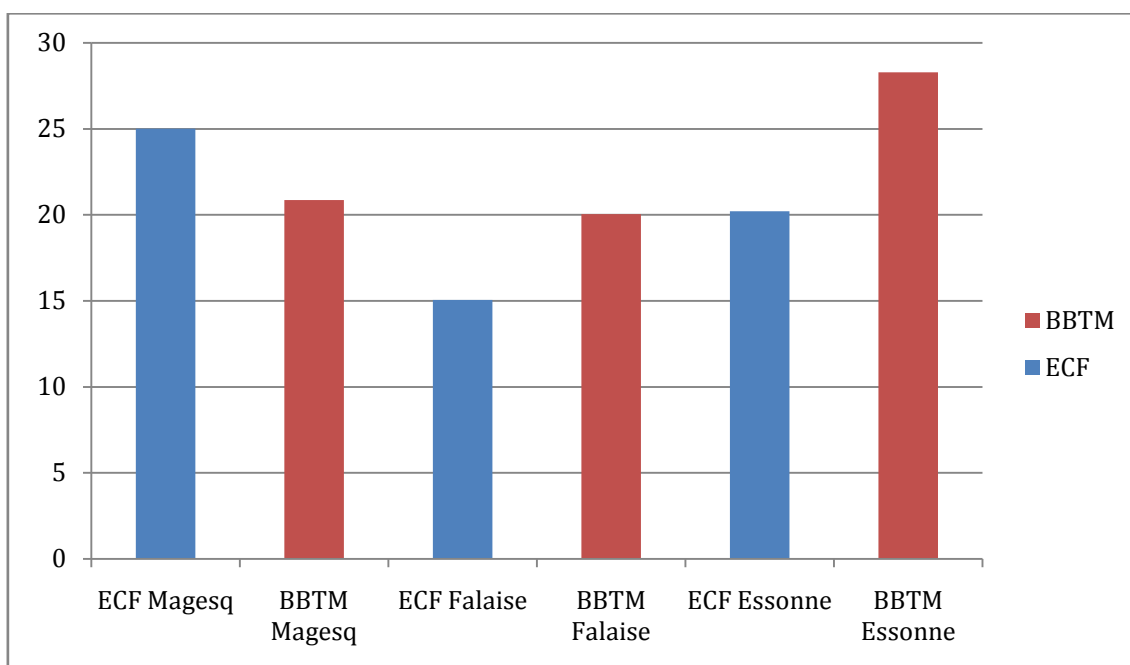
Tableau 22: Émissions Totales comparées de GES de l'ECF et un BBTM Classique au chantier de Magescq (en t.CO₂)

6.2.2. Interprétation des résultats:

J'utilise les graphiques 10 et 11 pour interpréter les résultats.



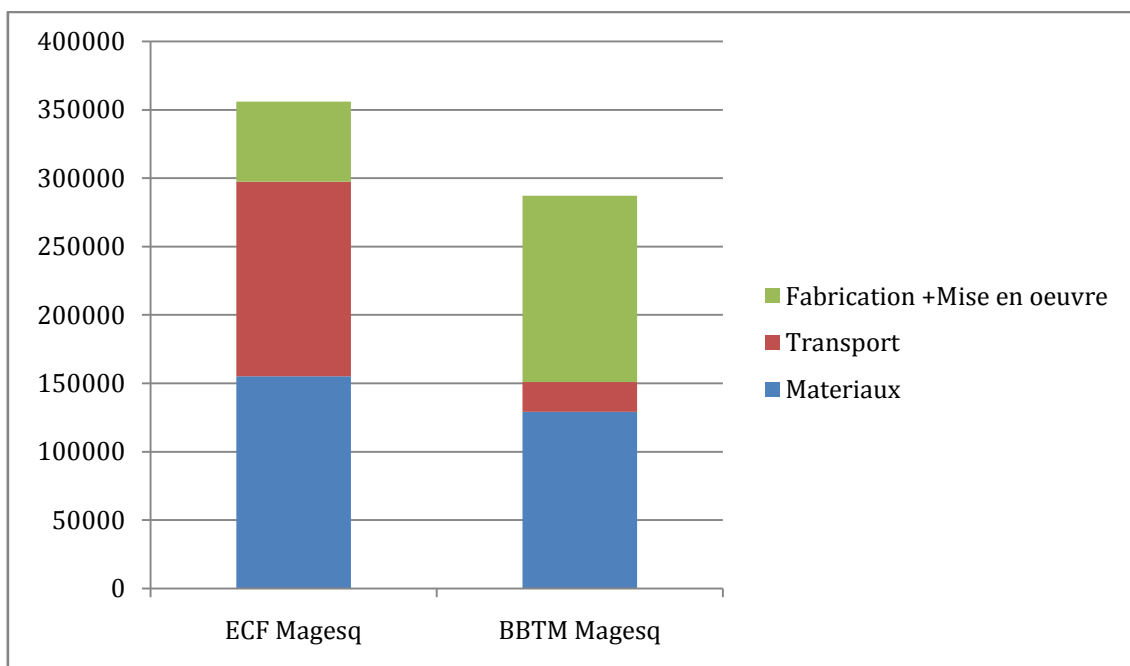
Graphique 10: Consommation comparée d'énergie procédée de l'ECF et d'un BBTM Classique dans les trois cas de chantier (en MJ)



Graphique 11: Émissions Totales comparées de l'ECF et d'un BBTM Classique dans les trois cas de chantier (en t.CO₂)

Tenant compte que la seule carrière des BBTM que j'ai changé c'est celle de Magescq, il n'est pas étonnant que l'ECF reste moins impactant que le BBTM aux cas de Falaise et Essonne, cette fois-ci avec une différence plus marquée, qu'on peut observer dans le cas de Falaise, où avant la introduction de la machine ECF de Probinord l'ECF et le BBTM étaient pareils pendant que maintenant il y a un écart considérable entre les deux techniques.

Cependant, dans le chantier de Magescq l'épargne obtenu par la machine ECF de Probinord ne compense pas le changement de carrière. C'est pour cela que c'est le BBTM qui reste plus écologique que l'ECF. Pour mieux observer ce cas, je présente la Graphique 12:



Graphique 12: Consommation comparée en énergie procédée de l'ECF et d'un BBTM Classique dans le cas de Magescq (en MJ)

Note: Ici j'ai introduit que la Consommation en Energie Procédée car les résultats avec les Émissions Totales de GES sont pareils qualitativement. Les Émissions Totales de GES sont présentées dans l'Annexe 5.

Une fois plus je remarque la importance du transport, notamment des granulats, sur le bilan global. Même si l'impact de la *Fabrication* plus la *Mise en oeuvre* du BBTM est

beaucoup plus élevé que celui de l'ECF, le *Transport* reste un saisié assez flexible pour qu'il soit déterminant dans le bilan global.

Selon la norme, les granulats des ECF ont les mêmes exigences que ceux des BBTM. Quand même, il peut y avoir d'autres facteurs qui affectent à la décision de Probinord de prendre la carrière de Thiviers et pas celle de Labatut, comme la compatibilité de sa formule ECF avec une certaine classe de granulats ou des dispositions logistiques par rapport aux autres chantiers de la zone. Pourtant, dès point de vue économique, j'ai fait une première approximation (voir Annexe 6) en calculant la différence de coût entre la carrière de Thiviers et cette nouveau carrière de Labatut en regardant l'écart de distance, le prix du combustible et les péages pour conclure que très probablement est beaucoup moins cher d'utiliser les granulats de Labatut pour un chantier situé dans la zone où Magescq est.

7. Introduction des agrégats d'enrobé aux ECF

En cette partie du projet j'analyse les effets d'introduire d'agrégats d'enrobés à la formule des ECF par rapport à la comparaison environnementale entre les ECF et les BBTM.

Ma démarche consiste en introduire progressivement des pourcentages d'agrégats dans la formule de l'ECF et de les comparer avec SEVE avec les BBTM, et analyser ainsi l'impact des agrégats d'enrobés sur le bilan global.

7.1. Hypothèses

Je conserve les hypothèses sur les ECF et BBTM que j'avais déjà introduit. Concernant les agrégats, je considère qu'on les obtient de la centrale d'enrobage dont procèdent les BBTM, à Labatut (à 41km. du chantier). Je ne considère pas donc que les agrégats sont obtenus sur place.

7.2. Présentation des résultats

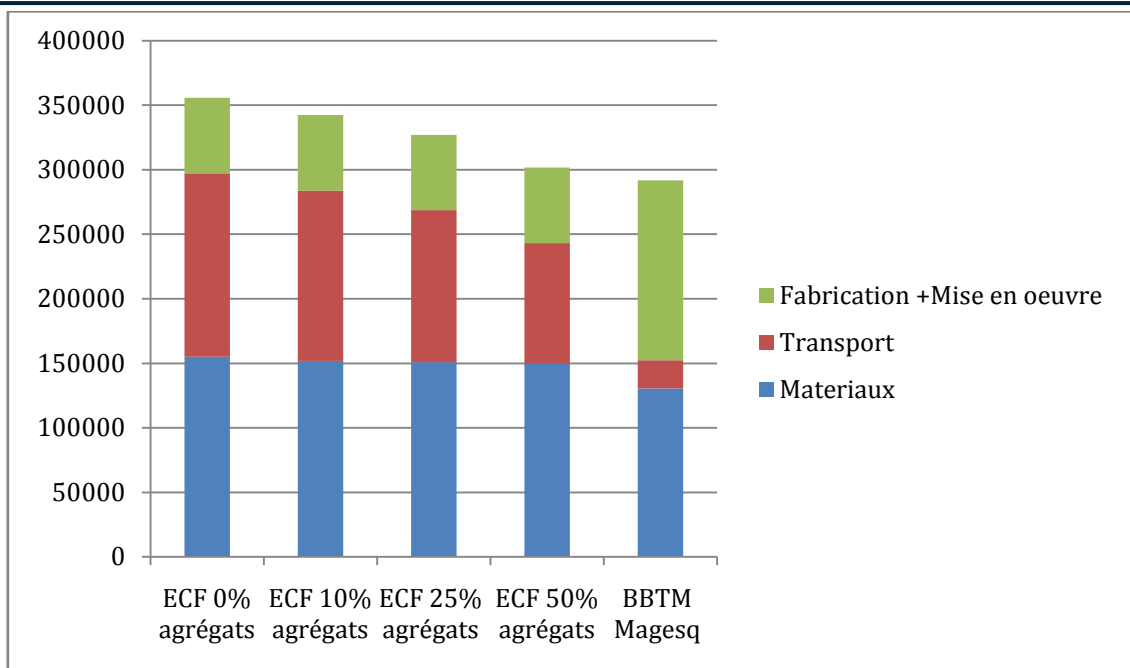
Je montre ici seulement l'indicateur *Consommation en énergie procédée* car qualitativement nous suffit, et dans le cas de Magescq pour être celui le plus défavorable pour l'ECF. Les résultats pour l'indicateur *Émissions Totales en GES* sont dans l'Annexe 6.

<u>Solution</u>	<u>Matériaux</u>	<u>Transport</u>	<u>Fabrication + Mise en œuvre</u>	<u>Total</u>
ECF 0% agrégats	155 190,89	142177,12	58545,00	355 913,01
ECF 10% agrégats	151 852,21	131943,03	58545,00	342 340,24
ECF 25% agrégats	150 987,28	117623,97	58545,00	327 156,25
ECF 50% agrégats	149 536,85	93730,6	58545,00	301 812,45
BBTM Magescq	130 486,13	21868,46	139523,47	291 878,06

Tableau 23: Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités d'agrégats d'enrobé et d'un BBTM Classique dans le cas de Magescq (en MJ)

7.3. Interprétation des résultats

J'utilise le Graphique 13 pour interpréter les résultats.



Graphique 13: Consommation comparée en énergie procédé de plusieurs ECF avec différentes quantités d'agrégats d'enrobé et d'un BBTM Classique dans le cas de Magescq (en MJ)

On voit qu'à mesure qu'on augmente la quantité d'agrégats l'impact des ECF diminue. Cependant, la cause de cette réduction n'est pas si évidente. À priori, on pourrait penser que c'est à cause du matériel utilisé, c'est-à-dire, à cause de l'introduction des agrégats. Mais si on regarde la partie *Matériaux*, celle-ci ne varie que très peu d'un ECF à l'autre. Par contre, c'est dans la partie *Transport* où se produit la réduction. La cause de celle-ci se réduit donc au fait que les agrégats d'enrobé sont situés plus proches au chantier que les granulats que Probinord utiliserait au cas qu'elle n'ajoute pas d'agrégats. Et cette réduction peut s'atteindre aussi en changeant de carrière pour les granulats de l'ECF. Je conclus que selon les indicateurs *Consommation en énergie procédée* et *Émissions Totales de GES*, il n'y a pas une variation significative si on ajoute d'agrégats.

Cependant, on peut considérer aussi la consommation de tonnes de granulats naturels comme un indicateur environnemental. C'est selon cet indicateur que les agrégats ont un impact positif sur le milieu naturel, car on épargne de granulats naturels en recyclant ceux qu'on avait utilisé pour les enrobés à remplacer.

Pour finir, il faut remarquer que l'introduction d'agrégats d'enrobés aux ECF c'est une technique relativement nouvelle, et qu'il n'y a pas encore d'études concluantes qui nous permettent d'affirmer que celle-là soit appropriée. Dans cette problématique, la thèse

d'Arbia GARFA sur l'introduction d'agrégats d'enrobé aux ECF permettra dans le futur de bien maîtriser cette technique.

8. Conclusions

8.1. Conclusion sur la méthodologie utilisée

La première conclusion que j'ai obtenu de ce projet c'est l'énorme importance de la méthodologie qu'on prend. Celle-ci détermine quelles saisies faut prendre, comment déterminer si sont négligeables ou non, et comment les traiter. Elle structure aussi le projet en déterminant le flux d'obtention de résultats, de tel façon qu'on peut obtenir un analyse différent en dépendant de la méthodologie qu'on utilise.

Si on prend ce projet comme exemple, la division en une première partie où je n'avais pas mis la machine ECF de Probinord et la carrière de Labatut; et en une deuxième partie où j'avais considéré ces facteurs; m'a permis mieux analyser l'importance du matériel ou l'impact du transport. À mon avis, si j'aurais introduit d'abord la machine ECF et la carrière de Labatut je n'aurais pas bien observé leur impact.

Aussi, j'avais considéré dès le commencement du projet l'outil SEVE pour comparer les techniques d'entretien. Ce choix a fortement déterminé la recherche des saisies: après avoir vérifié les bases de données dont SEVE se nourrit, c'était lors de l'outil que j'ai classifié les saisies en négligeables ou pas. En plus, l'interface de SEVE m'a beaucoup simplifié la recherche de données en me les limitant, notamment à l'heure de les demander à Probinord.

Je conclus que dans un projet comme celui-ci, où il peut y avoir dizaines de facteurs à tenir compte, c'est impératif d'avoir un cadre qui limite et organise la recherche de saisies. Par rapport à ce projet, je suis très satisfait de la méthodologie choisie, qui a beaucoup simplifié la recherche bibliographique tenant compte que le domaine du projet (l'évaluation environnementale au BTP) n'est pas très développé.

8.2. Conclusion sur les résultats

L'objectif de ce projet était de vérifier que l'ECF est moins impactant que sa technique concurrente, le BBTM, et de chiffrer cet écart.

- D'abord, j'ai démontré que l'ECF est effectivement moins impactant environnementalement que le BBTM dans un cas général. Quand même, j'ai pu constater que c'est le transport des composants, notamment des granulats, qui détermine le bilan environnemental global, même si à priori c'était la mise en œuvre en froid de l'ECF qui semblait déterminante. Ainsi, j'ai montré les cas d'Essonne et de Falaise, où la distance de transport des granulats était très semblable pour l'ECF et le BBTM et par conséquent c'était l'ECF plus écologique que le BBTM. Par contre, si on a un chantier assez éloigné de la carrière des ECF, le transport de granulats peut devenir si coûteux environnementalement si bien que le BBTM reste moins impactant que l'ECF, comme j'ai montré au cas de Magescq.
- Au même temps, j'ai réussi à chiffrer l'écart entre l'impact des ECF et celui des BBTM avec l'outil SEVE. J'ai démontré que selon les indicateurs environnementaux *Consommation en Énergie Procédé* et *Émissions Totales de GES*, l'ECF reste moins impactant sauf pour le cas de Magescq.
- Aussi, la division de ce projet en deux parties, m'a permis de bien analyser l'impact de la machine ECF et du changement de carrière. Je peux conclure que l'utilisation d'une machine plus performante peut beaucoup réduire la consommation énergétique et pas seulement augmenter la production. Concernant au changement de la carrière pour les BBTM de Magescq, j'ai montré que celui-là rend le BBTM plus écologique que l'ECF. En plus, auprès d'une première approximation, je constate que si on change la carrière pour les granulats des ECF au cas de Magescq on épargne aussi économiquement et pas seulement dès point de vue environnementale.

Par rapport à l'utilisation des BBTM Tièdes, j'ai montré que cela réduit l'impact des BBTM en leur fabrication, mais que cette réduction reste très petite face à l'importance d'autres facteurs, notamment celle du transport de granulats. En plus, cette réduction n'est pas assez important pour convertir les BBTM en plus écologiques que les ECF.

Pourtant, même si les BBTM Tièdes sont très intéressants environnementalement, ceux-ci sont beaucoup plus complexes à mélanger, et peuvent être instables sous température basse. C'est pour cela que les entreprises routières n'ont pas beaucoup utilisé les BBTM Tièdes.

Et concernant à l'introduction des agrégats d'enrobé, j'ai montré que la seule avantage écologique que les agrégats introduisent c'est la réduction de la consommation de granulats naturels. En effet, si on regarde que les indicateurs *Consommation en Énergie Procédé* et *Émissions Totales de GES* les agrégats ne changent presque rien.

Et finalement, comme j'avais expliqué à la introduction des objectifs, il fallait tenir compte du scénario de Probinord, entreprise partenaire de ce projet, et d'être capable d'obtenir de résultats qui lui soient utiles pour son activité, par exemple pour compléter une fiche technique de ses ECF. Je crois avoir bien résolu cet enjeux: j'ai fourni à Probinord une évaluation environnementale à partir d'une comparaison de son ECF qui chiffre l'écart environnementale positif de son produit par rapport à la technique la plus concurrentielle à celui-ci, le BBTM. Et j'ai fait cela en respectant les données fournies par Probinord: dès sa formulation ECF jusqu'à sa machine ECF ou ses cas de chantier.

- En plus, comme j'ai déjà expliqué c'est le transport des granulats celui qui a le plus de poids sur le bilan global. Alors, le transport d'émulsion, dont sa quantité est presque négligeable par rapport aux granulats, n'a pas un impact très important. Je conclue que le cas de Probinord, où elle a une seule usine d'émulsion qui fournit celle-ci à ses chantiers de toute la France, implique qu'un coût environnemental très petit, même négligeable si on le compare avec l'impact du transport des granulats.

9. Bibliographie

- [1] France. Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain. 25 mars 2009
- [2] CAVAGNOL, I. (2016). "Life+ Sustaineuroroad Software" en *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*
- [3] *Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées* (2003). Guide technique juillet 2003. Paris: Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- [4] Université Paul Sabater Toulouse III. *Tome II Cours de Master de Routes 2011/2012*. <<http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/pres/mastergc/telechargement/pedagogie/COURS%20ROUTE%20UPS%20MASTER%202011%20II%20Impression.pdf>> [Consulté le 7/09/2016]
- [5] *Norme matériaux bitumineux coulés à froid NF EN 12273* (2010). Note d'information n° 21. Paris: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.
- [6] *Aide au choix des granulats pour chaussées basée sur les normes européennes* (2013). Note d'information n° 24. Paris: Institut Des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.
- [7] SEMEX. *Fiche technique carrière de Labatut*. <http://www.cemex.fr/file/Fiche_Labatut_2014_VF.pdf> [Consulté le 7/09/2016]
- [8] VINCI Autoroutes. *Tarifs de péage*. <http://www.vinci-autoroutes.com/fr/system/files/pdf/2016/04/asf-tarifs_print_2016_book0516.pdf> [Consulté le 12/07/2016]

ANNEXES:

Annexe 1:

Formulation d'un ECF de Probinord de 2014

Matériaux	Teneur (%)
Sable sec	79
Eau de mouillage	3,3
Emulsion de bitume	9,9
Eau d'apport	7,2
Dope	0,4
Ciment	0,2

Annexe 2 :

Quantité de chaque composant de l'ECF:

Formule ECF :		pour 360T	Type transport
Sable sec	79,0%	360	
eau de mouillage	3,3%	15,03797468	
sable naturel	82,3%	375,0379747	camion 30t
émulsion de bitume 60% ECF	9,9%	45,11392405	citerne 24t
eau d'apport	7,2%	32,81012658	citerne 24t
dope	0,4%	1,82278481	citerne 24t
ciment CEM II	0,2%	0,911392405	camion 9t

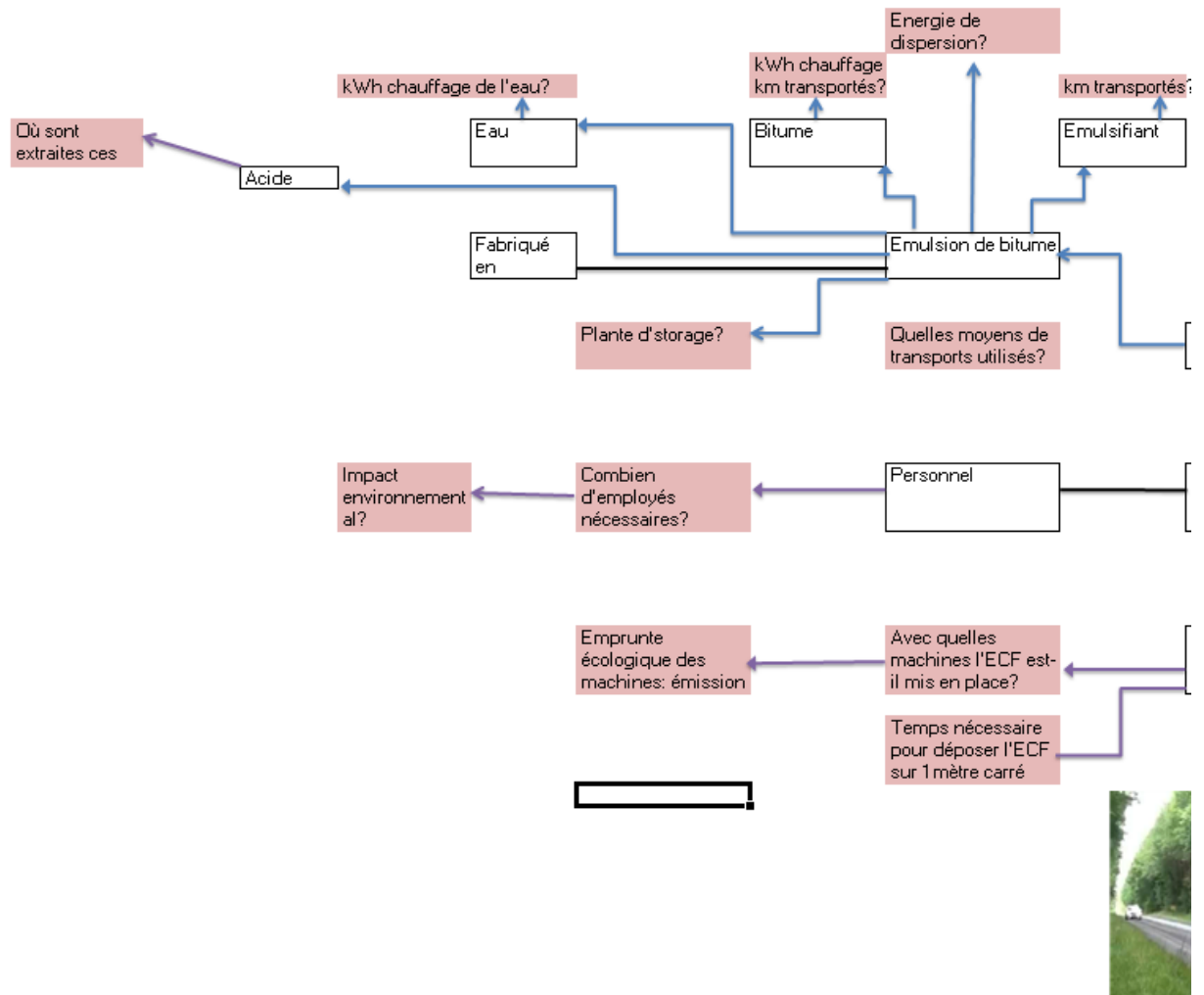
Annexe 3:

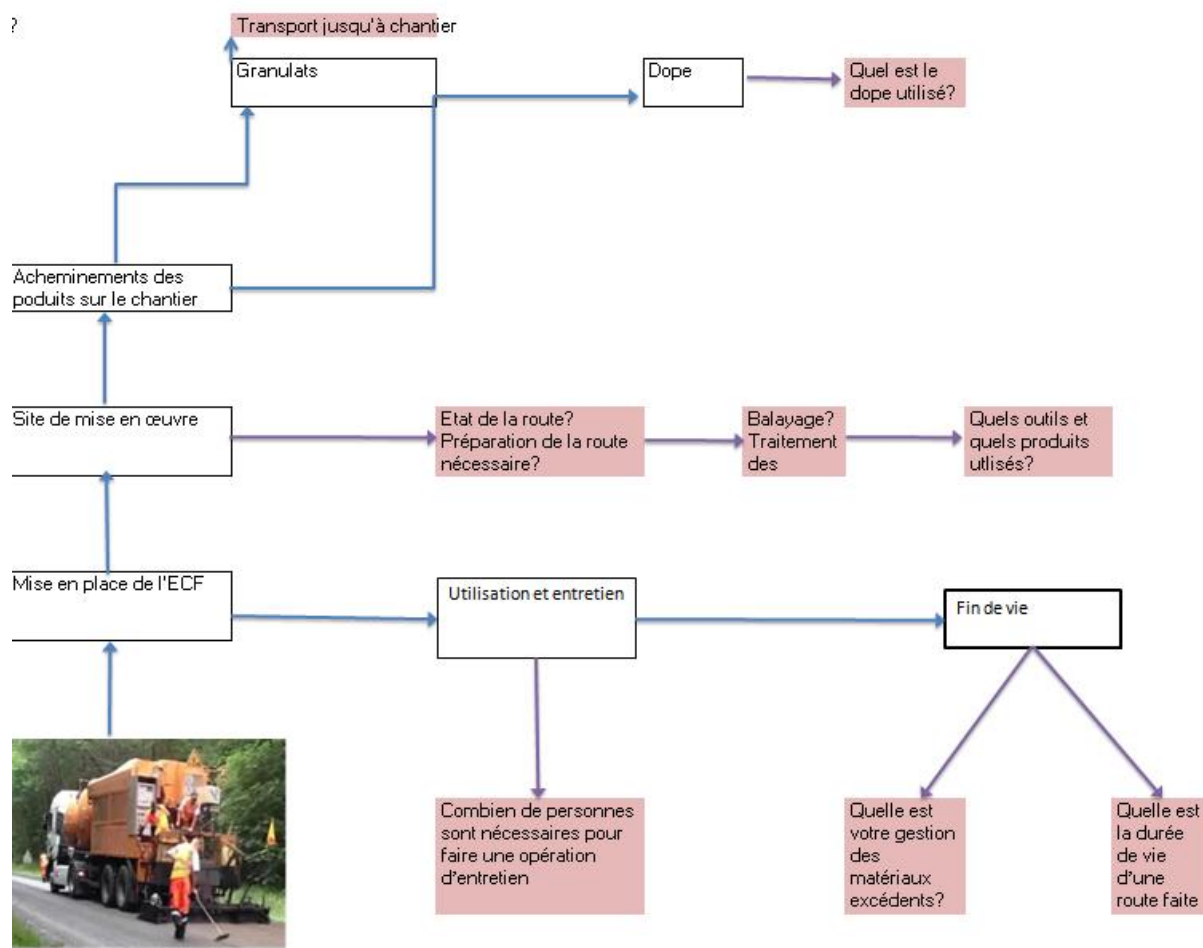
Caractéristiques de la machine ECF de Probinord

Puissance de l'engin	75 kW
Heures utilisation/jour	8h à 12h/jour
Consommation par kW de base à	0.25 L/kW
100% de charge d'un moteur	
Masse de l'engin	13.5 t
Durée de vie de l'engin	15 à 20 années
Taux de ralenti	inconnu
Taux de charge	inconnu

Annexe 4:

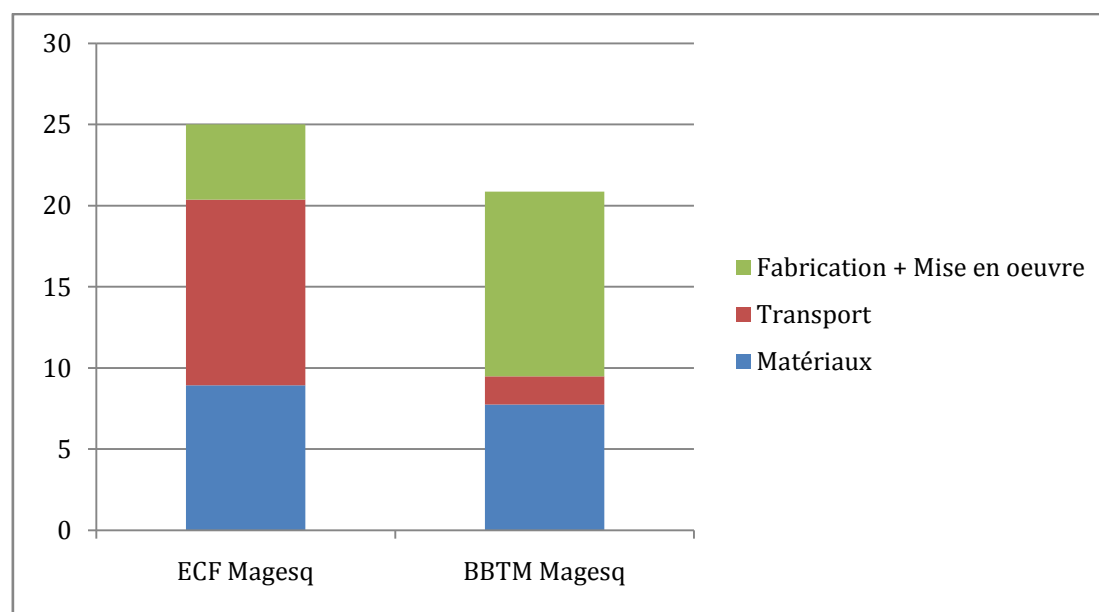
Schéma détaillé du cheminement d'obtention de saisies:





Annexe 5:

Détail des Émissions Totales de GES en Magesq



Annexe 6:

Approximation à la différence de coût d'avoir la carrière à Thiviers ou à Labatut pour les granulats des ECF au cas de Magescq:

Impact financier	A89 et A63
Distance Thiviers-Magescq (km)	340
Distance Labatut-Magescq (km)	40
Différence distance carrière-chantier (km)	300
Temps trajet Thiviers-Magescq (h)	3
Temps trajet Labatut-Magescq (h)	0,67
Différence temps trajet (h)	4,66
Consommation combustible/distance (L/km)	0,5
Coût combustible/litre (€/L) (1)	1,278
Différence Coût combustible (€)	383,4
Coût péages (€) (2)	121,2
Différence coûts Thiviers-Labatut TOTAL	504,6 €

(1) Prix du gazole: <http://www.prix-carburants.gouv.fr//>

(2) Prix péage A89 et A63: 27.6€ et 33€ respectivement⁸

⁸ VINCI Autoroutes. *Tarifs de péage.*

<http://www.vinci-autoroutes.com/fr/system/files/pdf/2016/04/asf-tarifs_print_2016_book0516.pdf> [Consulté le 12/07/2016]